

TECNOLOGÍAS AVANZADAS

de Mecatrónica,
Diseño y
Manufactura

IV Congreso Internacional
AMDM 2018





TECNOLOGÍAS AVANZADAS

de Mecatrónica, Diseño y Manufactura

IV Congreso Internacional
AMDM 2018



Tecnologías Avanzadas de Mecatrónica, Diseño y Manufactura

Memorias Cuarto Congreso AMDM

Universidad Autónoma de Manizales

Gabriel Cadena Gómez

Rector

Iván Escobar Escobar

Vicerrector Académico

Carlos Eduardo Jaramillo Sanint

Vicerrector Administrativo y Financiero

Alberto Cardona Aguirre

Vicerrector de Desarrollo Humano y Bienestar

© Editorial Universidad Autónoma de Manizales

Antigua Estación del Ferrocarril

E-mail: editorial@autonoma.edu.co

Tel: +57 (6) 872 7272 ext. 166

Manizales, Colombia

Manizales, noviembre de 2018

ISBN: 978-958-8730-94-3

Comité Científico

Representantes de las Universidades Organizadoras: Libardo Vicente Vanegas Useche (Universidad Tecnológica de Pereira) / Sebastián Durango Idárraga (Universidad Autónoma de Manizales) / Oscar Fernando Avilés Sánchez (Universidad Militar Nueva Granada) / Joao Luis Ealo Cuello (Universidad del Valle) / Juan Manuel Chaparro Fonseca (Universidad Central) / Adriana Gómez Gómez (Pontificia Universidad Javeriana - Cali) / Juan Pablo Casas Rodríguez (Universidad de los Andes) / Carlos Andrés Trujillo Suarez (Universidad de Antioquia) / Paola Andrea Niño Suarez (Instituto Politécnico Nacional)

Comisión Local: Sebastián Durango Idárraga / José Sebastián López / César Augusto Álvarez Vargás / Yenny Marcela Orozco Ocampo / Andrea Gómez Alzate / Luis Perdomo Hurtado / Diana Lorena Cardona Montoya / Rubén Darío Flórez Hurtado / Juan Sebastián Rincón / Lina Rocío Osorio

Pares Evaluadores: Adonai Zapata Gordon / Alex Mauricio Ovalle Castiblanco / Alonso de Jesús Chica Leal / Alvaro Restrepo / Andrea Gómez Alzate / Andrés Tovar / Beatriz Eugenia Mira Rada / Carlos Alberto Montilla Montaña / Carlos Alberto Romero Piedrahita / Carlos Andrés Trujillo Suárez / Carlos Ernesto Arrieta Gonzales / Carlos López Botero / César Augusto Álvarez / Clara Inés Buriticá Arboleda / Daniel Suarez / David Restrepo Arango / Diana Lorena Cardona Montoya / Diana Yomali Ospina López / Diego Fernando Barajas Sepúlveda / Edgar Alfredo Portilla-Flores / Eduardo Alberto Pérez Ruiz / Eduardo Trujillo / Edwan Anderson Ariza Echeverri / Edwar Andrés Torres López / Elizabeth Hoyos / Ernesto Córdoba Nieto / Ernesto Cuartas Morales / Fabio Marcelo Peña Bustos / Francisco Botero / Francly Nelly Jiménez García / Gabriel Calle Trujillo / Hector A. Tinoco / Hernán David Insuasti Ceballos / Hernán González Rojas / Hernando González Acevedo / Horacio Coral-Enríquez / Isabel Cristina Echeverry / Jaime Arcos Legarda / Javier Roldán McKinley / Jayanta Banerjee / Jesús Alberto Pérez Mesa / Jhon Alexander Reinoso Vargas / Jimmy Unfried-Silgado / Joao Luis Ealo Cuello / Jorge Andrés Sierra Del Rio / Jorge Luis Bris Cabrera / José Luis Rodríguez Sotelo / José Sebastián Lopez Velez / Juan Camilo Lezcano Benítez / Juan José Arbeláez Toro / Juan Pablo Ángel López / Juan Sebastián Rincón Tabares / Juliana Restrepo / July Andrea Gómez Camperos / Laura I. Velásquez / Laura Juliana Suárez Collazos / Laura Rocío Giraldo Torres / Leydi Julieta Cárdenas / Libardo Vicente Vanegas Useche / Lina

Rocio Osorio / Lisandro Vargas Henríquez / Luis Alberto Toro Carvajal / Luis Carlos Triviño Torres / Luis Perdomo Hurtado / Manuel Del Jesús Martínez / Maria Bárbara Calva Yáñez / María Juliana Cardona Márquez / María Luisa Pinto Salamanca / Mariela Gómez / Nelson Agudelo / Noemi Hernández-Oliva / Olga Lucía Ocampo López / Oscar Avilés / Oscar Moscoso Londoño / Oscar Ruiz Salguero / Paola Andrea Niño Suárez / Paulo César Cárdenas Montoya / Rafael Esteban Vásquez Moncayo / Ricardo Moreno / Rosaura Anaid Suárez / Rubén Darío Flórez Hurtado / Santiago Murillo Rendón / Sebastián Durango / Vladimir Prada Jiménez / Wilman Pineda / Yenny Marcela Orozco Ocampo.

Comité Editorial

Compilación: Sebastián Durango Idárraga

Coordinación Editorial: Laura V. Obando Alzate

Diseño y Diagramación: Melissa Zuluaga / Sebastián Durango Idárraga / María Camila Carmona Franco

Director General del Congreso

Libardo Vicente Vanegas Useche

Comité Logístico

Andrea Gómez Alzate / Isabel Cristina González Gómez / Estefanía Duque Montes / Claudia Elena Rojas Marin / Alba Patricia Arias Orozco / Lina Rocio Osorio Serna / María Camila Hoyos Restrepo / Adolfo Andrés Álvarez Arango / Mariline Catalina Delgado Martínez / María Camila Carmona Franco / María Camila Tabares Valvuela / Viviana Vargas / Valentina Escobar / Uber Ancizar Grajales

Agradecimiento

El comité organizador del Cuarto Congreso Internacional sobre Tecnologías Avanzadas de Mecánica, Diseño y Manufactura agradece a todas las entidades y personas que apoyaron e hicieron viable este proyecto. Particularmente:

- A los investigadores, profesores y estudiantes que confiaron al congreso sus trabajos y que forman el núcleo de la comunidad AMDM.
- A los pares evaluadores por su tiempo y compromiso con la calidad científica del congreso.
- A los invitados internacionales, Dr. Jorge Correa Panesso, Prof. David Restrepo Arango, Dr. Carlos Aníbal Fuentes Rojas, Dra. Astrid Lorena Giraldo Betancur, y Dr.(c) Hector Andrés Tinoco Navarro, por su generosa contribución académica.
- A la Editora UAM, Laura Viviana Obando Alzate, por liderar el comité editorial.
- A la Prof. Andrea Gómez Alzate por coordinar la logística del congreso.
- Al grupo de universidades organizadoras y a sus representantes por la participación, la divulgación, y el respaldo académico.
- Al Prof. Octavio Andrés González Estrada y a la editora Ivonne Sáenz Suárez en la Universidad Industrial de Santander, por haber acogido una selección de trabajos destacados para publicación en la en la Revista UIS Ingenierías.
- Al Icetex por la financiación de los invitados internacionales, Dr. Jorge Correa Panesso y Dra. Astrid Giraldo Betancur, a través del programa *Fellows Colombia*.
- A los Jóvenes Investigadores, Ing. Adolfo Álvarez, Ing. Mariline Delgado, D.I. María Camila Hoyos, y a las estudiantes María Camila Carmona y María Camila Tabares, por el apoyo en la logística del evento.

- A la Econ. Isabel Cristina González G., a la D.G. Estefania Duque, y al equipo de trabajo de la Asociación de Graduados UAM por ser el par logístico del evento.
- A los directivos de la UAM por su compromiso y generosidad con todos los asuntos del congreso.

Índice

Agradecimiento	4
Índice	10
Presentación	11
Reseñas de los Invitados Internacionales	12
Trabajos completos	16
Diseño Concurrente Aplicado a un Mecanismo de Cuatro Barras Utilizando un Algoritmo Evolutivo	17
Diseño de un Dispositivo Rehabilitador de Dedo, Tipo Efecto Final	28
Aproximación al Modelamiento de Rugosidad en Superficies con Triple Curvatura en Fresado Multi-Ejes	40
Implementación de un Controlador No Lineal para la Sincronización Exponencial de un Sistema Caótico	54
Control Predictivo con Restricciones para un Sistema de Doble Tanque Acoplado	66
Análisis del Efecto Venturi para la Admisión de Aire en el Quemador de una Criadora de Pollos	77
El Diseño de Máquinas en Tecnología Mecánica	91
La Manufactura y el Estándar Internacional Iso 16100-1	107
Transformación Tecnológica de un Vehículo de Combustión (MCI) a Vehículo Eléctrico (VE)	120
Herramientas para Asistir el Proceso de Diseño para el Sector Metalmeccánico	132
Fabricación y Micro Ensamblaje de Antenas en Impresión 3D	144
Diseño de una Máquina para Descascarar Nueces Medicinales Lecythis Minor para Obtención de Selenio	158
Diseño de Mecanismo Adaptable para Robot de Inspección Interna de Tuberías	170

Control Robusto Basado en Observador GPI para el lazo de corriente de un convertidor AC/DC tipo Boost Bridgeless	185
Diseño de un Control LQG y un Control Robusto para un Sistema TORA	195
Análisis de la Extrusión Directa de una Probeta de Aluminio 6061 Utilizando el Método de Elementos Finitos	208
Desarrollo de un Sistema de Digitalización 3D Usando Técnicas de Fotogrametría	222
Hardware-In-the-Loop de un Péndulo Simple Utilizando un Controlador PID Implementado en dos Arquitecturas	235
Respuesta Hidráulica y Mecánica en una Bomba Centrífuga de Baja Velocidad Especifica Debida a Inestabilidades de Carga Parcial	251
Diseño Óptimo de un Árbol de Transmisión con Materiales Compuestos	263
Modelo Cinemático Acoplado de un Manipulador Móvil	276
Control de Posición de un Robot Planar de 2GDL Implementado en Hardware-In-the-Loop	290
Un Enfoque Alternativo para la Optimización Topológica de Estructuras Reticulares	302
Diseño de un Sistema de Control de Dirección para un Robot Virtual de Dos GDL, Mediante la Interacción de una Señal de EOG	318
Una Revisión Corta sobre la Educación en Ingeniería: Un Enfoque a las Prácticas Educativas sobre el Diseño de Máquinas	333
Resúmenes	344
Manufacturing Processes: Material Forming and Material Removal Processes from the Standpoint of Energy Economy	345
Vulnerabilidad al Cambio Climático de los Sistemas de Electricidad con Participación de Hidroeléctricas: Revisión de Literatura	346
Properties of Bamaboo Fibres and Bamboo Fibre Composites	349
Energía Firme de Plantas Solares Fotovoltaicas en Colombia para el Cargo por Confiabilidad	352
Estimación de Huella de Carbono por Vehículos de Carga Pesada en Manizales, Colombia	354
Monitoreo de la Integridad Estructural basado en Impedancia de Muestras de Hueso con un Diente Integrado y Acoplado a un Dispositivo Piezo-actuado	359
Aprovechamiento del Momento Lineal y Angular de los Haces Acústicos para la Generación de Energía Eléctrica: Resultados Preliminares	361
Combinación de Técnicas Acústicas y Fotónicas para Estimar Contenido de Agua en Hojas de Plantas	363
Wearable para el Monitoreo de la Señal ECG con Electrodo no Convencionales en Pacientes que Padecen Enfermedades Cardiovasculares	365
Construcción de un Robot Delta Usando Filtros Mecánicos y Modelo Generalizado de la Dinámica y Geometría	368
Caracterización de Uniones Adhesivas en Materiales Compuestos con Diferentes Espesores de Unión Sometidas a Cargas Cuasiestáticas e Impactos Cíclicos	370

Calibración de Ruteadora CNC Mediante un Modelo Cuasi-Estático de Error y Fotogrametría Monocular	372
Implementación de Alternativas Tecnológicas en la Recolección de Aguacate HASS . . .	375
Diseño de un Control PID y un Controlador LQG para un Exoesqueleto de Dos Grados de Libertad	378
Efecto de la Cáscara de Arroz en la Cementación Sólida del Acero SAE 1020	381
Exponente de Escala de las Funciones de Estructura Longitudinales y Transversales en Turbulencia Homogénea e Isotrópica Generada en un Túnel de Viento	383
Estudio del Grado de Endurecimiento y Resistencia al Desgaste por Deslizamiento del Acero AISI 1045 Endurecido por Temple con Refrigerante Automotriz y para Mecanizado	388
A Low-Cost and Scaled Automation System for Education in Industrial Automation . . .	390
Implementación de un Sistema de Control para Regular la Velocidad y Posición de Motores Industriales Utilizando el Protocolo de Comunicación OPC	392
EXPRO: Exoesqueleto para Rehabilitación de Miembro Superior	394
Complemento Experimental al Modelo para Medida de Dureza de Martens y Heyn . . .	396
Controlador CNC para Modernización del Proceso de Fresado a Bajo Costo: Caso con Fresadora Supernova	398
La Rugosidad Influenciada por Factores Geométricos en Fresado de Superficies.	401
Evaluación de Diferentes Tratamientos Superficiales en el Comportamiento a Fatiga de un Acero CA6NM	403
Influencia del Contenido de ZnO en la Cristalización y Microestructura de Vitrocerámicas Obtenidas a partir de Residuos Sólidos	405
Development of a Computer Application for Extraocular Muscle Analysis Based on a Parallel Kinematics Model of the Eye	407
Desarrollo de un Banco de Instrumentación para la Captura de Señales Provenientes de un Motor de Combustión Interna Diésel	409
Análisis Dinámico Comparativo del Efecto de la Técnica Movimiento del Snatch Sobre la Articulación de la Rodilla	411
Diseño de una Máquina de Rotomoldeo Basada en el Principio de Giróscopo	413
Potenciación de la Plataforma DCP-UAO para la Impresión de Materiales Cerámicos y Poliméricos	416
Evolución de Perfil Alar Conducida por Dinámica de Fluidos Computacional	420
Diagnóstico de Fallas Tempranas de Rodamientos en Mecanismos Susceptibles al Desbalanceo y a la Desalineación	423
Integración de Plataforma para la Gestión de Datos en Almacén UNTools Orientada a Industria 4.0 como Sistema Multi-Agente	425
Pronosupination Mechanism for a Rehabilitation Device of the Upper Extremity	428
Evaluación de la Resistencia a la Fatiga de Placas de Aleación de Magnesio AZ31B Soldadas por Fricción Agitación	430

Desarrollo de una Cubierta para Prótesis Utilizando Fibras Naturales	433
Investigación Numérica Sobre el Uso de Álabes Multi-Elemento en Turbina Hidrocinética de Eje Horizontal	435
Diseño e Implementación de un Sistema de Extrusión de Filamento para Impresión 3D a Partir de Botellas Recicladas	438
Confiabilidad Desde el Diseño de Equipos Industriales	442
Estudio del Efecto en el Diámetro de Salida de un Tanque Cónico en la Eficiencia de una GVT	445
Paneles Fotovoltaicos Térmicos Refrigerados por Disipadores de Calor Modelados Me- diante Dinámica Computacional de Fluidos	448
Incidencia de la Longitud del Tubo de Mezcla en el Rendimiento de un Eyector Subsónico Vía CFD	453
Optimización de la Turbina Michell Banki Mediante la Implementación del Método PSO	456
Estado de la Investigación en Energía en Colombia	459
Reducción del Costo Computacional en Procesos de Diseño Óptimo al Usar Puntos Heredados	462
Incidencia de la Geometría en la Demanda de Aire en Conductos de Superficie Libre Usando CFD	464
Control por Rechazo Activo de Perturbaciones en Cascada para Sistemas con Tiempo Muerto y Fallos en Subsistema	467
Arquitectura y Propiedades Magnéticas de Compuestos Híbridos Basados en Nanopartí- culas de Oro y Óxido de Hierro	469
Diseño de Intercambiadores de Calor de Coraza y Tubo por Medio de Optimización de un Modelo Termo-Económico Riguroso	471
Caracterización Experimental de la Aerodinámica del Rotor de un Cuadricóptero en Hover	473
Evaluación del Desempeño Energético de Sistemas Solares Fotovoltaicos Instalados en el Departamento de Caldas	477
Flujo Cruzado en Torno a un Vehículo Tipo Hatchback	480
Estrategias de Eficiencia Energética en Vehículos Livianos del Transporte por Carretera en Colombia	485
Estudio de Superficie Libre en la Descarga de una Compuerta Radial Mediante Técnica de CFD	486
Validación CFD de una Nueva Metodología de Diseño para Turbina de Flujo Cruzado . .	488
Estudio Computacional de los Rotores de un Cuadricoptero en Hover Utilizando el Metodo de Red de Vortices No-Estacionario	491
Estrategia para Disminuir la Incertidumbre en la Medida de Posición Global de un UGV	494
Obtención de MMC Superficial en AA5052-H32 Empleando el Proceso FSP	496
Obtención de Juntas Disimiles de la Aleación de Aluminio AA7075 – T6 y Polietileno de Alta Densidad (HDPE) Empleando el Proceso Friction Stir Welding (FSW)	499

Diseño y Construcción de una Impresora 3D Tipo Delta por el Método de Despliegue de la Función Calidad QFD	502
Acercamiento Teórico al Análisis de Estabilidad de una Microrred Durante los Saltos entre Modos de Operación	506
Rechazo de perturbaciones en Robots Bípedos Dinámicos	508
Manufactura Aditiva Aplicada al Diseño de Moldes de Inyección	510
Estudio Experimental del Arrastre Aerodinámico en Vehículos Ligeros	516
Influencia del Espesor en el Comportamiento a Flexión de Vigas Simétricas Elásticas Sujetas a Grandes Deflexiones	519
Análisis de un Motor Neumático de Paletas y su Potencial Aplicación en Vehículos Híbridos	522
Ciclo Atkinson: Una Alternativa para Mejorar la Eficiencia en Motores de Combustión Interna	525
Algoritmo de Control para Dibujar Figuras Geométricas con Chocolate en un Sistema de Posicionamiento Cartesiano	526
Sistema Integrado para el Estudio de Potenciales Relacionados a Eventos (SIPRES) . . .	530
Diseño Geométrico de una Zapata Doble para Cimentación Aplicada en Torres de Transmisión Eléctrica	533
Plataforma de Prueba de Vuelo y Estabilización de Drones “Giros”	538
Interacción con Entornos Hápticos de 1GDL para el Diseño de Sistemas de Control Bilateral de Robots	541
Rendimiento Energético de un Horno Equipado con Quemadores Regenerativos Bajo el Régimen de Combustión Sin Llama	543
Caracterización Climatológica para la Implementación de Generadores Eólicos por Medio de Estación Meteorológica	546
Diseño de un Sistema Robótico Teleoperado Usando una Interfaz sin Contacto	548
Estudio Computacional de Películas Delgadas Magnéticas Policristalinas a Escala Atómica	551
Producción y Caracterización de Nanopartículas de Sílice a Partir de Cáscara de Arroz .	553
Efecto de las Nanopartículas de Sílice, Obtenidas de la Cascarilla de Arroz, en el Refuerzo de Placas de Fibrocemento	555
Robótica Aplicada, un Desafío para la Agricultura	557
Estrategias Pedagógicas para Mejorar la Enseñanza del Diseño de Máquinas en un Programa de Tecnología Mecánica	561
Estudio de Movimientos en la Cosecha Manual de Limón Tahití	563
Índice de Autores	569
Índice Temático	571

Presentación

El Congreso Internacional sobre Tecnologías Avanzadas de Mecatrónica, Diseño y Manufactura -AMDM- es una iniciativa incubada en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira, desarrollando la primera versión en 2012. En adelante el congreso ha sido bienal, siendo anfitrionas la Universidad Central (2014) y la Universidad del Valle (2016). El Cuarto Congreso AMDM fue organizado por la Universidad Autónoma de Manizales en cooperación con la Universidad Tecnológica de Pereira, la Universidad Militar Nueva Granada, la Universidad del Valle, la Universidad Central, la Pontificia Universidad Javeriana -Cali, la Universidad de los Andes, la Universidad de Antioquia, y el Instituto Politécnico Nacional de México. Asimismo, se contó con el apoyo logístico de la Asociación de Graduados de la Universidad Autónoma de Manizales y con el apoyo Financiero del ICETEX (programa Fellows).

El evento se celebró desde el 7 hasta el 9 de noviembre, en Manizales, y reunió a profesores, investigadores, profesionales y estudiantes de áreas afines al diseño, a la manufactura y a la mecatrónica, logrando la discusión e intercambio de conocimientos en conferencias magistrales, presentaciones orales y una sesión de pósteres.

Al igual que en las versiones anteriores, se destacó la participación de invitados internacionales con probada relevancia académica en los ejes temáticos del congreso. Se agradece su generosa participación. Los invitados fueron: Jorge Correa Panesso (*The University of Illinois at Urbana-Champaign*), David Restrepo Arango (*The University of Texas at San Antonio*), Carlos Aníbal Fuentes Rojas (*Katholieke Universiteit Leuven*), Astrid Lorena Giraldo Betancur (*Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN -Cinvestav-*), y Hector Andrés Tinoco Navarro (*Institute of Physics of Materials of the Academy of Sciences of the Czech Republic - Universidad Autónoma de Manizales*).

El AMDM 2018 contó con cerca de 180 asistentes —entre invitados, ponentes, investigadores, profesores, estudiantes y profesionales— y presentó 97 trabajos como ponencias orales y siete pósteres. Una selección de 22 trabajos fueron postulados para publicación en la revista UIS Ingenierías de la Universidad Industrial de Santander. Todos los trabajos presentados fueron evaluados por pares o por una comisión del comité científico. También se invitó a 14 Jóvenes Investigadores UAM para que presentaran siete pósteres y siete ponencias de semilleros de investigación.

Reseñas de los Invitados Internacionales

Astrid Lorena Giraldo Betancur

Investigadora
CONACYT-Cinvestav, México

Investigadora en el Departamento de Materiales del CONACYT-Cinvestav en Queretaro – México. Co-fundadora del Laboratorio Nacional de Proyección Térmica – CENAPROT. Investigadora en Ingeniería de Superficies, enfocada a procesos de síntesis de materiales biocerámicos y procesos de manufactura para el área biomédica.

Ponencia. *Perspectivas de Desarrollo en los Sectores Biomédico, Aeronáutico y de Generación de Energía Usando Tecnologías de Proyección Térmica*

Las tecnologías de proyección térmica han evolucionado durante las últimas décadas, permitiendo gracias a su versatilidad, atender problemáticas de casi cualquier sector de desarrollo que demande requerimientos específicos asociados con manufactura avanzada. En general, este tipo de tecnologías permite desde la funcionalización de superficies (recubrimientos) hasta la recuperación de piezas de alto valor agregado (concepto de manufactura aditiva), manifestándose como una serie de tecnologías eficaces y rentables para atender necesidades en un amplio rango de sectores industriales. Considerando esto, dentro del Laboratorio Nacional de Proyección Térmica – CENAPROT se han enfocado los esfuerzos a generar desarrollos de alto impacto, específicamente en sectores biomédico, aeronáutico y de generación de energía, donde los requerimientos son específicos y la tolerancia a su cumplimiento es mínima.

David Restrepo Arango

Assistant Professor
Department of Mechanical Engineering
University of Texas at San Antonio

Su programa de investigación se enfoca en la interfaz entre materiales arquitectónicos y diseño bioinspirado con la meta de avanzar en la síntesis y análisis de materiales y sistemas con nuevas propiedades y funcionalidades, cubriendo aplicaciones en salud, eficiencia energética, defensa, robótica, y desde la infraestructura civil hasta la ingeniería aeroespacial.

Keynote. *Design and Synthesis of Advanced Materials by Following Nature's Cookbook*

There is a strong demand for new paradigms in the design and synthesis of advanced high-performance materials. New technological developments, as well as environmental and economic

constraints, are motivating the research of new materials that exhibit multifunctionality, and that are capable of fulfilling conflicting and novel combination of properties. Fortunately, by millions of years of evolution, Nature has evolved efficient strategies to synthesize multifunctional materials with exceptional mechanical properties that are frequently superior to those found in traditional engineering materials. Therefore, devising how Nature employs different strategies to achieve these features present a tempting route for the design of high performance engineered materials and systems. In this talk, I will present a new bio-inspired architected material capable of dissipating energy with a performance similar to the one observed in polymeric and metallic honeycombs traditionally used in packing and protection applications. However, unlike these honeycombs, where energy dissipation is due to plastic deformation or damage, in this new bio-inspired system energy dissipation occurs without relying on the inelastic deformation of its base material. In addition, I will present recent advances in the characterization of the fundamental mechanisms that provide remarkable damage tolerance to the Diabolical Ironclad beetle, and the self-sharpening mechanisms observed in the Sea Urchin tooth.

Hector Andres Tinoco Navarro

Investigador

Institute of Physics of Materials de la Academia de Ciencias de la República Checa

Departamento de Mecánica y Producción de la UAM

Investigador Junior en el “Institute of Physics of Materials” de la Academia de Ciencias de la República Checa, Profesor Asociado de la Universidad Autónoma de Manizales. Investigación enfocada en Mecánica aplicada, vibraciones, optimización aplicada, análisis de problemas multi-físicos y de multi-escala, MEMS y Mecánica de fractura.

Keynote. *Numerical Modeling Approach for the Assessment of Mechanical Properties in Micro-structures*

Different approaches for the modeling and simulation of experiments that consider micro-structures are discussed in this work. Case studies show the different found challenges in characterization of the mechanical properties by using numerical tools.

Jorge Eduardo Correa Panesso

Post-Doctoral Fellow

Department of Mechanical Science and Engineering

University of Illinois, Urbana-Champaign, Illinois

Investigador en el Laboratorio de Automatización Flexible del Departamento de Ciencia e Ingeniería Mecánica de la Universidad de Illinois (UIUC), su investigación se ha enfocado en Diseño

de Máquinas Herramientas para Ingeniería de Precisión, Sistemas Micro-electrónicos para Nanomanufactura, Manufactura Digital (Industria 4.0), Sistemas Ciber-Físicos, y Control Numérico Computarizado. Ha sido reconocido con el premio a la mejor ponencia en la Conferencia Norteamericana de Manufactura (NAMRC) 2016 y con el Premio de Becario Docente del Departamento de Ciencia e Ingeniería Mecánica de la UIUC en las primaveras de 2015 y 2016, donde se calificó entre los mejores instructores.

Keynote. *A New Paradigm for Organizing Networks of Computer Numerical Control Manufacturing Resources in Cloud Manufacturing*

Cloud manufacturing is quickly emerging as an infrastructure-as-a-service (IaaS), analogue for distributed production and supply chains, that integrates manufacturing providers and customers. This research develops a cloud-based cyberphysical platform as a new service for spawning and organizing cloud manufacturing networks of computer numerical control (CNC) resources, provisioned and managed over the internet. The proposed layered architecture consists of hardware, virtualization, operating system, and network layers. Using modern web development technology, an operating system is created that services and virtualizes manufacturing resources in the network. This operating system offers a new, and much-needed model for physical resources and application software distribution in Cloud Manufacturing. The platform is designed with a micro-service architecture, that is used for manufacturing nodes and software applications or "assets", and implemented in a Mongo, Express, Angular, Node (MEAN) stack.

Carlos Aníbal Fuentes Rojas

Senior Post-Doctoral Associate
Department of Materials Engineering
Katholieke Universiteit Leuven (KUL), Belgium

Investigador en Diseño y Manufactura de Compuestos Sostenibles, enfocándose en materiales reciclados y compuestos y en tecnologías verdes. Titular de varias patentes con intereses de investigación en comportamiento mecánico de fibras naturales, compuestos bio-basados, interfaz de compuestos, dinámica de humedecido de líquidos y licuado de polímeros. Sus investigaciones han sido financiadas por la Unión Europea, la Comisión Suiza para la Tecnología y la Innovación, el Instituto para la innovación en materiales de Países Bajos, además de varios proyectos financiados por el sector privado.

Ponencia. *Técnicas Avanzadas para la Caracterización de la Interfaz en Materiales Compuestos*
Para predecir el comportamiento de materiales compuestos de alto desempeño, no basta con entender el comportamiento mecánico de sus dos constituyentes individualmente, la fibra y la matriz; también se debe entender el comportamiento mecánico de la región que los une. La interfaz entre la fibra y

la matriz es una de las variables que puede ser optimizada mediante tratamientos físicos y químicos que produzcan cambios estructurales en la superficie de la fibra y, por tanto, una mejora de las propiedades y características de los materiales compuestos. Para poder optimizar la interfaz se requiere primeramente caracterizarla mediante el uso de metodologías especialmente diseñadas para este fin.



TRABAJOS COMPLETOS

IV Congreso Internacional
AMDM 2018



Diseño Concurrente Aplicado a un Mecanismo de Cuatro Barras Utilizando un Algoritmo Evolutivo

Concurrent Design Applied to a Four-bar Mechanism Using an Evolutionary Algorithm

*Cuauhtémoc Morales Cruz^{1, γ}, Edgar Alfredo Portilla Flores¹, Rosaura Anaid Suárez Santillán¹,
Maria Bárbara Calva Yáñez¹, Noemi Hernández Oliva¹*

1. Instituto Politécnico Nacional, Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Cómputo, Ciudad de México, México.

γ. Autor correspondal: cumoralescruz@gmail.com

Resumen

Este trabajo presenta el diseño concurrente de un mecanismo de cuatro barras para trabajar de forma óptima en conjunto con un controlador PID cuyo principal objetivo es garantizar una velocidad angular constante en el eslabón de entrada. La estrategia de solución que se implementa traduce el problema de diseño mecánico y de control en un problema de optimización mono objetivo restringido con el fin encontrar los parámetros que cumplan con los requerimientos de diseño planteados. Por otro lado, el problema de optimización planteado es resuelto por medio de un algoritmo evolutivo. Se presenta la solución obtenida, así como su comportamiento haciendo uso de simulaciones.

Palabras clave: Diseño concurrente, mecanismo de cuatro barras, Evolución Diferencial.

Abstract

This work presents the concurrent design of a four-bar mechanism to work optimally in conjunction with a PID controller whose main objective is to guarantee a constant angular velocity in the input link. The implemented approach translates the mechanical and design problems into a constrained mono-objective optimization problem. Therefore, the solution to this translation allows finding the parameters that meet the design requirements. On the other hand, the proposed optimization problem is solved using an evolutionary algorithm. The obtained solution is presented as well as its behavior through some simulations.

Keywords: Concurrent design, four-bar mechanism, control, differential evolution

Introducción

El uso de mecanismos planos de cadena cinemática cerrada o restringida ha sido implementado a lo largo de todo el desarrollo del diseño de maquinaria [1]. Esto ha sucedido gracias a la simplicidad y versatilidad de muchos de estos mecanismos al ser utilizados para realizar tareas de movimientos específicos, seguimiento de trayectoria en forma continua o guiado de cuerpos rígidos. En particular el mecanismo de cuatro barras ha tenido una gran aplicación en diversos problemas de [2][3][4]. Y mas aún, es uno de los mecanismos que conserva un gran interés por parte de la comunidad científica y sigue siendo estudiado [5][6][7]. Sin embargo, hoy en día este tipo de mecanismo debe cumplir con las tareas tradicionales de seguimiento de trayectoria o guiado de cuerpos rígidos y además debe satisfacer un comportamiento dinámico deseado o bien trabajar con el menor consumo energético posible.



En este sentido, la Metodología de Diseño para Control (DFC, por su siglas en inglés), fue propuesta en [8] y en su presentación sugiere el rediseño mecánico de la estructura con el fin de reducir la complejidad de la dinámica del sistema. De esta manera DFC pretende obtener una respuesta del sistema mucho más predecible y así lograr una simplificación en el diseño del controlador cuyo principal objetivo es obtener una velocidad angular constante de 30 rad/s en el eslabón que puede girar completamente o manivela del mecanismo. Sin embargo, en lugar de llevar a cabo el rediseño completo de la estructura mecánica como se sugirió por otros investigadores [9], en [8] se opta por hacer una redistribución de la estructura mecánica para un sistema ya existente de cuatro barras. Para llevar a cabo la redistribución de la estructura mecánica, en [8] se exponen dos propuestas. La primera aplica el método de balanceo completo de fuerzas de sacudimiento y la segunda consiste en adicionar a la primera, el método de balanceo de momentos de sacudimiento. Para investigar la efectividad de los dos enfoques que planteó en el marco de la propuesta de diseño para control, se llevó a cabo la simulación de los resultados obtenidos. Por lo que se propuso un controlador PD para los tres casos: el problema original, el balanceo de fuerzas de sacudimiento y la combinación de balanceo de fuerzas y momentos de sacudimiento. Además, se menciona claramente que la sintonización del controlador la hizo a prueba y error, hasta obtener resultados aceptables para los tres casos.

Por otro lado, en [10] se aplicó un controlador PID al problema original del trabajo en [8] y se logra obtener muy buenos resultados, como se describe a continuación. El objetivo de control es también alcanzar y mantener una velocidad constante en la manivela y el comportamiento obtenido del sistema en estado estacionario presenta un menor error. Por lo tanto, el trabajo desarrollado en [10] muestra que incluso un controlador genérico como el PID puede lograr un buen desempeño siempre y cuando sus ganancias sean seleccionadas de forma óptima.

Con estos antecedentes, se observa que los trabajos en [8] y [10] obtienen menores márgenes de error al problema de regulación cuando se comparan con enfoques aplicados anteriormente. Hay que tomar en cuenta que los enfoques previos obtienen el diseño de la planta y del controlador de forma independiente o separada. A su vez, mantienen abierta la posibilidad de obtener aún mejores resultados si se encuentra un conjunto de parámetros dinámicos, estructurales y/o de control que cumplan con los requerimientos establecidos si este proceso se realiza de forma integrada o concurrente.

En este trabajo se presenta el diseño concurrente de un mecanismo de cuatro barras que toma en cuenta la localización del centro de masa para cada eslabón, así como la sintonización óptima de un controlador PID para cumplir con la tarea de regulación en la velocidad angular cuyo valor deseado es 30 rad/. Adicionalmente, se debe satisfacer un tiempo de levantamiento y un sobre-tiro máximo en la respuesta del sistema. Se muestran los resultados en simulación y se presentan las soluciones obtenidas. La información mostrada en este artículo se estructura de la siguiente forma: en la sección II se presenta el modelo dinámico del mecanismo de cuatro barras con el cual se va a trabajar, en la sección III se presenta la metodología que se sigue para resolver el problema, la sección IV expone el algoritmo implementado y finalmente en la sección V y VI se presentan los resultados y las conclusiones.

Modelo dinámico

Las ecuaciones que describen la dinámica se obtienen utilizando el enfoque de Euler-Lagrange, donde el Lagrangiano $\mathcal{L}(\theta, \dot{\theta})$ descrito en (1), es la diferencia entre la energía cinética (\mathcal{K}) y la energía potencial (\mathcal{U}) total del sistema a modelar. Las variables q_j representan el conjunto de



variables generalizadas que describen al sistema. De esta manera, las ecuaciones de movimiento del sistema se obtienen, al calcular de manera iterativa, las operaciones descritas en (2) para cada una de las variables generalizadas y donde además Q_j representa las fuerzas generalizadas no conservativas que interactúan con cada una de las variables.

$$\mathcal{L}(q_j, \dot{q}_j) = \mathcal{K}(q_j, \dot{q}_j) - \mathcal{U}(q_j) \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}(q_j, \dot{q}_j)}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}(q_j, \dot{q}_j)}{\partial q_j} = Q_j \quad (2)$$

Particularmente, para el sistema de estudio en este documento tiene un grado de libertad y una variable generalizada. El diagrama esquemático completo para el sistema de cuatro barras se muestra en la Figura 1. Los parámetros $L_i, l_{c_i}, \theta_i, \varphi_i, m_i, J_i$ mostrados en la Figura 1, corresponden a la dimensión, la posición del centro de masa, el ángulo respecto del marco de referencia XOY , el ángulo de la posición del centro de masa, la masa y el momento de inercia, respectivamente, para cada uno de los eslabones. Adicionalmente, se contempla la existencia de un resorte y un amortiguador unidos al eslabón que trabaja como balancín, cuyos parámetros se pueden observar en la figura como K y B .

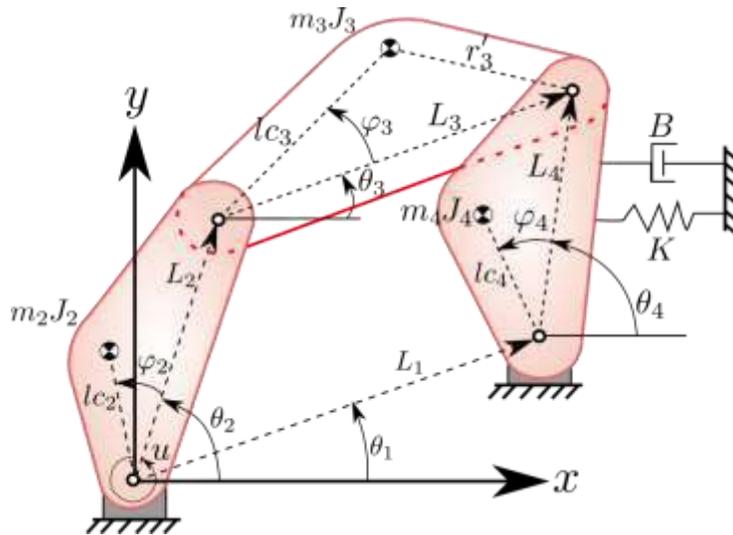


Figura 1: Diagrama del mecanismo de cuatro barras

El análisis cinemático [5] del MCB-FAR es necesario para obtener la velocidad angular $\dot{\theta}_i \forall i = \{2,3,4\}$ y la velocidad lineal v_{ix}, v_{iy} del centro de masa del enlace i -ésimo con respecto al marco inercial. La velocidad angular y lineal se describe en (3)-(5).

$$\dot{\theta}_i = \gamma_i \dot{\theta}_2 \quad (3)$$

$$v_{ix} = \alpha_1 \dot{\theta}_2 \quad (4)$$



$$v_{iy} = \beta_i \dot{\theta}_2 \quad (5)$$

$$\alpha_2 = -l_{C_2} \text{sen}(\theta_2 + \varphi_2) \quad (6)$$

$$\alpha_3 = -L_2 \text{sen} \theta_2 - l_{C_3} \gamma_3 \text{sen}(\theta_3 + \varphi_3) \quad (7)$$

$$\alpha_4 = -l_{C_4} \gamma_4 \text{sen}(\theta_4 + \varphi_4) \quad (8)$$

$$\beta_2 = l_{C_2} \text{cos}(\theta_2 + \varphi_2) \quad (9)$$

$$\beta_3 = L_2 \text{cos} \theta_2 - l_{C_3} \gamma_3 \text{cos}(\theta_3 + \varphi_3) \quad (10)$$

$$\beta_4 = -l_{C_4} \gamma_4 \text{cos}(\theta_4 + \varphi_4) \quad (11)$$

$$\gamma_2 = 1 \quad (12)$$

$$\gamma_3 = \frac{L_2 \text{sen}(\theta_4 - \theta_2)}{L_3 \text{sen}(\theta_3 - \theta_4)} \quad (13)$$

$$\gamma_4 = \frac{L_2 \text{sen}(\theta_3 - \theta_2)}{L_4 \text{sen}(\theta_3 - \theta_4)} \quad (14)$$

En las siguientes líneas se definen la energía cinética y potencial del sistema de cuatro barras para realizar las operaciones descritas por la ecuación (2). La ecuación (15) plantea la energía cinética total del sistema de manera general.

$$\mathcal{K} = \frac{1}{2} \sum_{i=2}^4 \left[m_i (\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2) + J_i \dot{\theta}_i^2 \right] \quad (15)$$

La energía potencial total es la suma de la energía en el resorte y la energía potencial debida a la gravedad, como se describe en (16). El primer término que corresponde al resorte es (17) y la parte debida a la gravedad está en (18).

$$\mathcal{U} = \mathcal{U}_s + \mathcal{U}_g \quad (16)$$

$$\mathcal{U}_s = \frac{1}{2} K (\theta_4 - \theta_{4,0})^2 \quad (17)$$

$$\mathcal{U}_g = g(m_2 l_{C_2} \text{sen}(\theta_2 - \varphi_2) + m_3 L_2 \text{sen}(\theta_2) + m_3 l_{C_3} \text{sen}(\theta_3 - \varphi_3) + m_4 L_1 \text{sen}(\theta_1) + m_4 l_{C_4} \text{sen}(\theta_4 - \varphi_4)) \quad (18)$$

Finalmente, se obtiene la ecuación de movimiento (19), donde u es el par de control que se aplica al sistema.

$$A(\theta_2) \ddot{\theta}_2 + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \theta_2} A(\theta_2) \dot{\theta}_2^2 + K \gamma_4 (\theta_4 - \theta_{4,0}) = u - B \gamma_4^2 \dot{\theta}_2 \quad (19)$$

Y sus componentes se definen en (20) -(31).



$$A(\theta_2) = C_0 + C_1\gamma_3^2 + C_2\gamma_4^2 + C_3\gamma_3\cos(\theta_2 - \theta_3 - \phi_3) \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \theta_2} A(\theta_2) &= 2C_1\gamma_3 \frac{\partial \gamma_3}{\partial \theta_2} + 2C_2\gamma_4 \frac{\partial \gamma_4}{\partial \theta_2} \\ &+ C_3 \frac{\partial \gamma_3}{\partial \theta_2} \cos(\theta_2 - \theta_3 - \phi_3) \\ &- C_3\gamma_3(1 - \gamma_3)\sin(\theta_2 - \theta_3 - \phi_3) \end{aligned} \quad (21)$$

$$C_0 = J_2 + m_2l_{C_2}^2 + m_3L_2^2 \quad (22)$$

$$C_1 = J_3 + m_3l_{C_3}^2 \quad (23)$$

$$C_2 = J_4 + m_4l_{C_4}^2 \quad (24)$$

$$C_3 = 2m_3L_2l_{C_3} \quad (25)$$

$$\frac{\partial \gamma_3}{\partial \theta_2} = \frac{L_2(D_1 - D_2)}{L_3\text{sen}^2(\theta_3 - \theta_4)} \quad (26)$$

$$\frac{\partial \gamma_4}{\partial \theta_2} = \frac{L_2(D_3 - D_4)}{L_4\text{sen}^2(\theta_3 - \theta_4)} \quad (27)$$

$$D_1 = (\gamma_4 - 1)\text{sen}(\theta_3 - \theta_4)\cos(\theta_4 - \theta_2) \quad (28)$$

$$D_2 = (\gamma_4 - \gamma_3)\text{sen}(\theta_4 - \theta_2)\cos(\theta_3 - \theta_4) \quad (29)$$

$$D_3 = (\gamma_3 - 1)\text{sen}(\theta_3 - \theta_4)\cos(\theta_3 - \theta_2) \quad (30)$$

$$D_4 = (\gamma_4 - \gamma_3)\text{sen}(\theta_4 - \theta_2)\cos(\theta_3 - \theta_4) \quad (31)$$

Metodología del diseño

Esta propuesta permite el cálculo de la posición del centro de masa de cada una de las barras del mecanismo así como también el valor de las masas de los eslabones. Sin embargo, no se consideran los momentos de inercia de los eslabones, es decir que $J_{(2,3,4)} = 0$. Esto es debido a que el trabajo que se presenta en este documento, hace un estudio preliminar en el cual se busca verificar el comportamiento de la metodología de diseño y analizar los resultados alcanzados para que posteriormente se introduzca la importante contribución de los momentos de inercia a la dinámica del sistema.

Función objetivo

El principal criterio de funcionamiento del sistema que evalúa el desempeño del sistema es el error entre el comportamiento deseado y el comportamiento de la planta como resultado del conjunto de parámetros que se le proporcionaron. Por tal motivo, se propone minimizar el error de velocidad para una entrada al sistema constante de 30 rad/s al calcular la integral del error cuadrático en la expresión (33).



Variables de diseño

El vector de diseño, que contiene todas las variables del problema de diseño, se encuentra masa (l_{C_i}), la desviación angular de la posición del centro de masa (φ_i), los valores de las masas (m_i) y las ganancias del controlador PID. De las cuales, las primeras nueve variables están relacionadas con la dinámica del sistema y las últimas tres con los parámetros del controlador.

$$\vec{p} = [l_{C_2}, l_{C_3}, l_{C_4}, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, m_2, m_3, m_4, kp, ki, kd]^T \quad \vec{p} \in \mathbb{R}^{12} \quad (32)$$

Restricciones

La primera restricción (34), es la dinámica del sistema, representada como un modelo matemático de ecuaciones diferenciales, con condiciones iniciales $x_0 = [0 \ 0]$. Las restricciones de desigualdad (35) y (36), son para establecer los parámetros de desempeño del controlador. Para este ejercicio se propuso cumplir con un tiempo de levantamiento no mayor a 0.1 segundos y un sobretiro máximo de 1.7% de la velocidad angular deseada, es decir que el valor de la velocidad en el tiempo en el que ocurre el pico ($\dot{\theta}_2(t_p)$) permanezca dentro de la cota propuesta. Adicionalmente se debe acotar el problema estableciendo los valores límite para cada una de las variables en (37)-(40).

Problema de optimización

El problema descrito anteriormente se resume en (33)-(40), el cual se trata de un problema de optimización dinámico mono-objetivo con restricciones y las variables de diseño se acotan a valores mínimos y máximos.

$$\min_{\vec{p} \in \mathbb{R}^{12}} f_1(\vec{p}) = \int_{t_0}^{t_f} e^2 dt \quad (33)$$

sujeto a:

$$\dot{\vec{x}} = f(\vec{x}(u, \vec{p}, t), u(\vec{p}, t), t) \quad (34)$$

$$g_1(\vec{p}) = t_r - 0,1 \leq 0 \quad (35)$$

$$g_2(\vec{p}) = \dot{\theta}_2 t_p - 0,017 \dot{\theta}_2^d \leq 0 \quad (36)$$

considerando las siguientes cotas para las variables de diseño:

$$0,1 \leq p_i \leq 1 \quad i = \{1 \ 2 \ 3\} \quad (37)$$

$$-\pi \leq p_i \leq \pi \quad i = \{4 \ 5 \ 6\} \quad (38)$$

$$0 \leq p_i \leq 2 \quad i = \{7 \ 8 \ 9\} \quad (39)$$

$$0 \leq p_i \leq 30 \quad i = \{10 \ 11 \ 12\} \quad (40)$$



Algoritmo implementado

Este estudio usa el Algoritmo de Evolución Diferencial [11] para resolver el problema de optimización planteado. Esta herramienta ha sido usada ampliamente y se ha posicionado como una buena herramienta para la resolución de problemas de ingeniería [12]. Este algoritmo basa su comportamiento en la reproducción de individuos en una población y el reemplazo de individuos por sus hijos se da únicamente si el hijo es mejor que el padre respecto de la función objetivo y de las restricciones. Para este trabajo se hizo uso de las reglas de Deb [13] como manejador de restricciones.

Para la solución de los problemas planteados en este trabajo se hizo uso de la versión de Evolución Diferencial: *rand/1/bin* el cual fue programado en MatLab® haciendo uso del pseudocódigo mostrado en el Algoritmo 1.

Algoritmo 1: ED/*rand/1/bin* en combinación con reglas de Deb

```
1 create a random population  $^0x_i \ i = 1, \dots, NI$ 
2 evaluate initial fitness population
 $f_0 = f(^0x_i)$ 
3 for  $g := 1$  to  $G_{max}$  do
4   for  $i := 1$  to  $NI$  do
5     select randomly  $\{r_1 \neq r_2 \neq r_3\}$ 
6     for  $j := 1$  to  $NV$  do
7       if  $U(0, 1) < CR$  then
8          $v_{ij} = r_{1j} + F(r_{2j} - r_{3j})$ 
9       else
10         $v_{ij} = ^{g-1}x_{ij}$ 
11      end
12    end
13    if  $^g v_i < ^{g-1}x_i$  then
14       $^g x_{ij} = ^g v_i$ 
15    else
16       $^g x_{ij} = ^{g-1}x_i$ 
17    end
18  end
19 end
```

Resultados

Este trabajo contempla treinta corridas del algoritmo con el fin de resolver el problema de optimización propuesto. Los parámetros que se utilizaron para correr el algoritmo son: el número de individuos con valor de 36, el número máximo de generaciones (G_{max}) con valor de 4500, el factor de cruza (CR) varía en el intervalo [0,8 1] siendo aleatorio por corrida y el factor de mutación (F) varía en el intervalo [0,4 0,9] y es aleatorio para cada individuo. La Tabla 1 muestra la estadística básica del experimento que se llevó a cabo. La expresión en (41) muestra los componentes del vector que corresponde a la mejor solución obtenida y en (42) se puede ver el valor de la función objetivo al evaluar el vector solución.



Tabla 1: Estadística

Corrida	Mejor	Mediana	Peor	Desviación estándar
30	514,4879	514,8960	515,0700	0,1684

$$\vec{p}^* = [0,3450 \quad 0,1115 \quad 0,5429 \quad 3,1416 \quad -2,2762 \quad 3,1416 \quad 0,1058 \quad 0,2559 \quad 0,0798 \quad 21,3418 \quad 16,4731 \quad 5,4831]^T \quad (41)$$

$$f(\vec{p}^*) = 5,144879094110538 \times 10^2 \quad (42)$$

Estos resultados fueron obtenidos de manera estable como se puede ver en las gráficas de convergencia y factibilidad mostradas en la Figura 2. Esta figura muestra las primeras 400 iteraciones de 4500 que se consideraron para alcanzar el resultado y muestran el comportamiento de la mejor, la mediana y la peor solución candidata tras haber realizado las 30 corridas. También se puede observar como los candidatos entran rápidamente a la zona factible y convergen a un resultado de forma repetitiva.

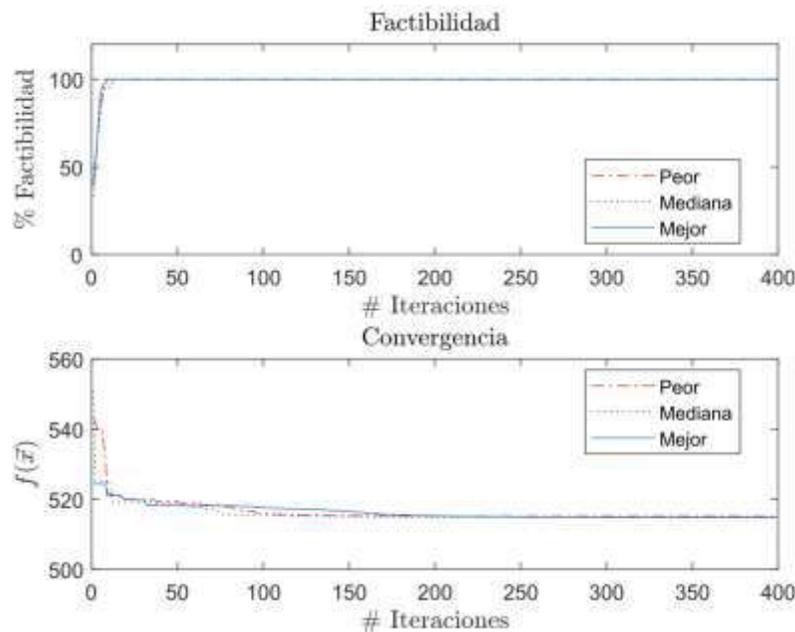


Figura 2: Convergencia y factibilidad para las primeras 400 generaciones

Con el fin de comparar los parámetros obtenidos con los resultados de otras metodologías, la Tabla 2 agrupa todos los parámetros que describen el mecanismo de cuatro barras. Las primeras tres columnas corresponden a la configuración inicial reportada en [8], al resultado de aplicar método de balanceo de fuerzas de sacudimiento y al resultado de la combinación de balanceo de fuerzas y momentos de sacudimiento. La cuarta columna muestra los parámetros calculados al aplicar la metodología de diseño concurrente descrita en este trabajo donde se puede observar que algunos de los valores se aproximan mucho entre los diferentes enfoques. En particular los valores φ_2 y φ_4 toman valores iguales a los obtenidos con metodologías basadas en cálculos matemáticos y donde únicamente se hace el balanceo de la estructura mecánica. Sin embargo, como era de esperarse, los parámetros obtenidos cambian radicalmente para otros valores con el fin de ajustarse entre sí para lograr un mejor acoplamiento al interactuar con el controlador.



Tabla 2: Parámetros del mecanismo de cuatro barras

Parámetros	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Diseño concurrente
L_2	0,1020	0,1020	0,1020	0,1020
L_3	0,6100	0,6100	0,6100	0,6100
L_4	0,4060	0,4060	0,4060	0,4060
L_1	0,5593	0,5593	0,5593	0,5593
l_{c_2}	0,0000	0,0944	0,0981	0,3450
l_{c_3}	0,3050	0,0457	0,0236	0,1115
l_{c_4}	0,2030	0,2030	0,1048	0,5429
m_2	1,3620	0,6810	0,6810	0,1050
m_3	1,3620	0,6810	0,6810	0,2559
m_4	0,2041	0,1021	0,1021	0,0798
J_2	0,0131	0,0010	0,0000	NA
J_3	0,1173	0,0257	0,0094	NA
J_4	0,0051	0,0026	0,0031	NA
φ_2	0	π	π	3,1416
φ_3	0	0	0	-2,2762
φ_4	π	π	π	3,1416
θ_1	0	0	0	0
K	0	0	0	0
B	0	0	0	0
K_p	15	15	15	21,3418
K_i	0	0	0	16,4731
K_d	5	5	5	5,4831

En las Figuras 3 y 4 se muestran de forma separada el comportamiento en estado transitorio y estacionario de las diferentes variables que determinan el comportamiento del sistema. En la Figura 3 se observa claramente que se cumple con el tiempo de levantamiento estipulado y que además también cumple con el sobretiro máximo permitido. El comportamiento obtenido en estado estacionario se mantiene debajo de una cota del 0.6% del valor de referencia.

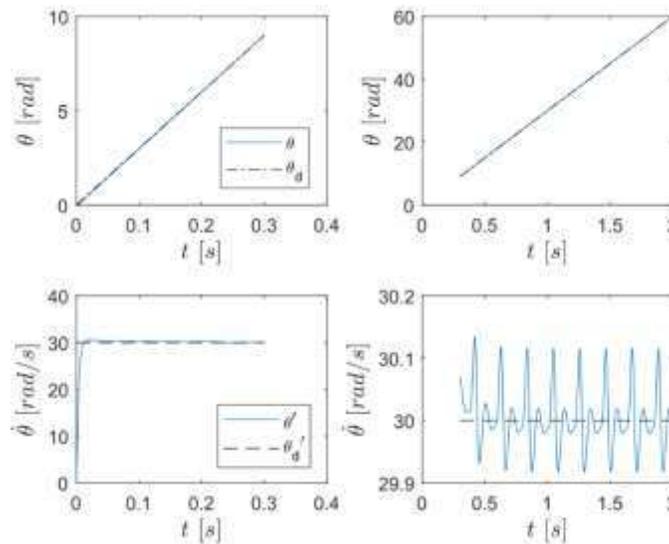


Figura 3: Estados del sistema en estado transitorio y estacionario (Posición y velocidad angular)



Adicionalmente, en la Figura 4 se observa el comportamiento de la señal de control y el error que se presenta durante el tiempo de simulación.

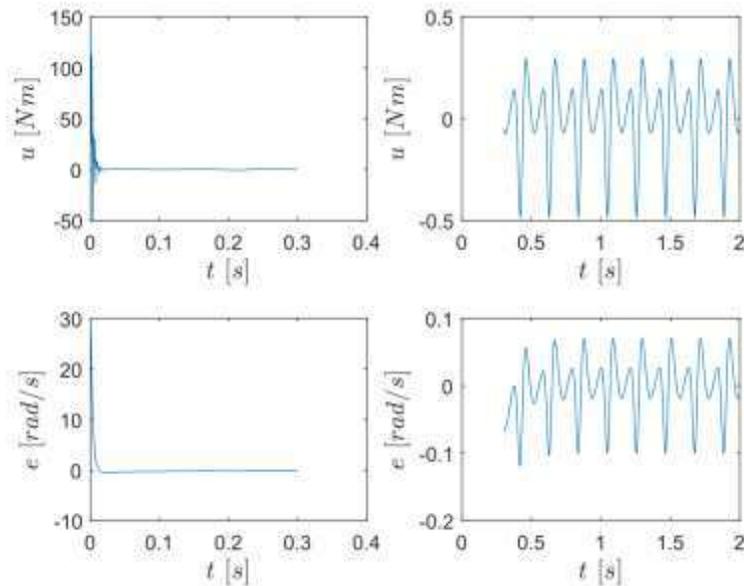


Figura 4: Señal de control y error en estado transitorio y estacionario

Conclusiones

Este artículo presenta el diseño concurrente de un mecanismo de cuatro barras, permitiendo así identificar de manera simultánea las propiedades dinámicas de cada una de las barras y los parámetros del controlador que va a interactuar con el sistema.

Como se puede ver en los resultados obtenidos, existe una configuración que satisface el problema de diseño planteado. Debido a la metodología implementada no se puede asegurar que sea un óptimo global o local, sin embargo si se puede asegurar el comportamiento estable del algoritmo y de la repetitividad del experimento. De esta manera se puede asegurar que el valor mostrado es un buen resultado y que se reporta como el mejor valor encontrado hasta este momento.

Finalmente, es importante mencionar que la metodología que se implementó permite contribuir al desarrollo de sistemas mecatrónicos que interactúen con sistemas de control o con otro tipo de maquinaria y lograr obtener mejores resultados para su correcta integración.

Referencias

- [1] R. Hartenberg and J. Denavit. Kinematic synthesis of linkages. New York : McGraw-Hill, 1964
- [2] M. E. Alfaro, D. I. Bolnick and P. C. Wainwright. Evolutionary dynamics of complex biomechanical systems: an example using the four-bar mechanism. *Evolution*, 58(3):495–503, 2004.



- [3] N. K. Teja. Kinematic design and fabrication of four bar mechanism to steer a human-powered vehicle. *International journal for research in emerging science and technology*. 3(4):102–107, 2016.
- [4] R. Zbikowski, C. Galinski and C. B. Pedersen. Four-bar linkage mechanism for insectlike flapping wings in hover: Concept and an outline of its realization. *ASME. J. Mech. Des.* 127(4):817–824, 2005.
- [5] K. Chaudhary and H. Chaudhary, Shape Optimization of Dynamically Balanced Planar Four-bar Mechanism. *Procedia Computer Science*. 57:519-526, 2015. 3rd International Conference on Recent Trends in Computing 2015
- [6] J. Zhang and C. R. McInnes. Reconfiguration of a four-bar mechanism using phase space connections. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 81:43 – 59, 2016.
- [7] A. Jaiswal and H. P. Jawale, "Comparative study of structural error in four bar mechanism for hyperbolic functions," *2017 International Conference on Advances in Mechanical, Industrial, Automation and Management Systems (AMIAMS)*, Allahabad, 2017, pp. 179-184.
- [8] W. J. Zhang, Q. Li and L. S. Guo, "Integrated design of mechanical structure and control algorithm for a programmable four-bar linkage," in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 4(4): 354-362, Dec. 1999.
- [9] K. Youcef-Toumi and A. T. Y. Kuo, "High-speed trajectory control of a direct-drive manipulator," in *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9(1):102-108, Feb. 1993.
- [10] M. B. Calva-Yáñez, P. A. Niño Suárez, M. G. Villarreal-Cervantes, G. Sepúlveda-Cervantes and E. A. Portilla-Flores. Differential Evolution for the Control Gain's Optimal Tuning of a Four-bar Mechanism. *Polibits*, 07: 67 – 73, 2013.
- [11] R. Storn and K. Price. Differential evolution – a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4):341–359, Dec 1997.
- [12] J.A. Cabrera, A. Simon, and M. Prado. Optimal synthesis of mechanisms with genetic algorithms. *Mechanism and Machine Theory*, 37(10):1165 – 1177, 2002
- [13] Kalyanmoy Deb. An efficient constraint handling method for genetic algorithms. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 186(2):311 – 338, 2000.

Agradecimientos

Los autores 1, 3 y 5 agradecen al CONACyT el apoyo otorgado a través de la beca para estudios de doctorado.

Todos los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional por el apoyo otorgado a través de la Secretaria de Investigación y Posgrado por medio del proyecto SIP20181162.



Diseño de un Dispositivo Rehabilitador de Dedo, Tipo Efecto Final

Design of an End-effector Type Finger Rehabilitator

I.A. Aguirre Hernández¹, P.A. Niño Suárez^{2, γ}, R.G. Cañizo Rodríguez², E.A Portilla Flores³ y E. Santiago Valentín.

1. Instituto Politécnico Nacional – UPIITA, Cd. México, México
2. Instituto Politécnico Nacional – ESIME Azcapotzalco. Cd. México, México
3. Instituto Politécnico Nacional – CIDETEC, Cd. México, México

γ. Autor correspondiente: pninos@ipn.mx

Resumen

En este artículo se presenta una metodología de diseño para un dispositivo de rehabilitación de falanges, el diseño inicia con la obtención de la trayectoria que se genera en la punta del dedo al realizar el movimiento de flexión/ extensión. Utilizando la trayectoria se realiza la síntesis dimensional de un mecanismo manivela-biela-corredera a partir de una técnica de optimización heurística, que garantiza que el dedo sigue la trayectoria con un mínimo error y que a su vez genera varias posiciones para la interconexión de los eslabones del mecanismo. Diseñado el mecanismo se realizó su implementación en un software de CAD y posteriormente se realizó un prototipo por manufactura aditiva (prototipado rápido), para evaluar el desempeño del mecanismo y como éste podría ser percibido por el paciente. El diseño se realizó con la premisa de obtener un mecanismo que pueda ser monitoreado durante su operación y sobre el que se puedan evaluar los problemas de desalineación que se tienen entre las falanges de los dedos, en el momento de realizar la terapia y que son una problemática común en los dispositivos para mecanoterapia actualmente utilizados en la rehabilitación de mano.

Palabras clave: Mecanismo Manivela-Biela-Corredera, Seguimiento de trayectoria, diseño óptimo.

Abstract

This paper presents a new methodology for design a finger phalanges rehabilitation, which beginning with the flexion-extension fingertip trajectory generation, for then obtained the dimensional synthesis for a slider-crank mechanism, this is accomplished by heuristic techniques that minimize the error at tracking the natural finger trajectory. Further, this methodology generates several topologies for the connections of the slider-crank mechanism. Once that the device has been elected, the next step was to implement in CAD software for performing in additive manufacturing (rapid prototyping) and so understanding how the patient could be perceived. The goal of the design was to obtain a device that could be monitored on operation time, and thus the misalignment finger can be evaluated. Because the finger misalignments are not considered actually by mechanotherapy devices that are used on a hand physical rehabilitation therapy.

Keywords: slider-crank mechanism, tracking finger trajectory, optimal design.

Introducción

Las alteraciones de movimiento de la mano pueden afectar la vida de una persona, ya que la pérdida motora en las manos implica la imposibilidad de realizar actividades de la vida diaria como alimentarse, vestirse e incluso asearse por sí mismo, lo que conlleva a que la calidad de vida del



afectado se vea disminuida. Para mejorar la motricidad del paciente y lograr que recobre su independencia, el tratamiento sugerido es la fisioterapia. Una etapa del tratamiento de rehabilitación de la mano está conformada por movimientos repetitivos para mejorar el tono muscular y la flexibilidad del miembro afectado y la otra etapa se dedica a la recuperación de movilidad de los dedos utilizando como principal ejercicio el abrir y cerrar la mano, donde se realiza flexión y extensión (F/E) en los dedos.

En la actualidad existen dos tipos de dispositivos que se utilizan como auxiliares en la rehabilitación de dedos; uno es el tipo exosqueleto, el cual se adhiere al cuerpo del dedo como un guante y el segundo es el de efector final, en el cual el mecanismo solo hace contacto en la punta del dedo del paciente y a partir de ahí se genera el movimiento de F/E.

Dentro de los dispositivos de tipo exosqueleto más utilizados se encuentra el BRAVO Hand [1], el cual consta de un mecanismo de barras que utiliza dos actuadores, uno para realizar el movimiento de F/E y el segundo para el de abducción/aducción (AB/AD) del dedo. Otro sistema de este tipo desarrollado es el robot rehabilitador UT Hand [2], diseñado por la Universidad de Texas, el cual también utiliza un dispositivo de barra para generar el movimiento en un sólo dedo.

En cuanto a los dispositivos comerciales de tipo efector final, el más conocido es Amadeo de Tyromotion [3], este sistema hace que el movimiento de F/E se realice sujetando los dedos sobre un mecanismo que realiza una trayectoria o desplazamiento lineal. Uno de los inconvenientes que este sistema presenta es que los dedos no siguen la trayectoria natural de movimiento, siguen una trayectoria lineal y de forma adicional dado que no se tienen en cuenta las desalineaciones entre las falanges de los dedos, continuamente el sistema se detiene porque los dedos del paciente se salen de los cabezales donde se ubican durante la terapia. En [4] se presenta otro desarrollo de este tipo de dispositivos, con la diferencia de que en este, el mecanismo sigue la trayectoria natural del dedo para realizar el movimiento de F/E. Sin embargo, no se considera el problema de autoalineamiento. El desarrollo de este dispositivo se realizó utilizando un método de diseño mecánico tradicional.

De acuerdo a recientes investigaciones, como se observa [5] y [6], una de las ventajas de los mecanismos de tipo efector final es que al realizar contacto el dispositivo con la punta del dedo, la rehabilitación puede ayudar a la reconexión del sistema nervioso con el cerebro, mejorando así la plasticidad de este.

En general, en la literatura se encuentra que los sistemas de rehabilitación son desarrollados utilizando métodos tradicionales, a partir de la experiencia en diseño mecánico de un experto. Uno de los campos que ha sido explorado en los últimos años es el diseño de mecanismos utilizando técnicas de optimización, específicamente por métodos heurísticos, [7], [8]. Algunos desarrollos de mecanismos diseñados mediante una estrategia de optimización se encuentran en [9], [10], [11] y [12]. En estos trabajos se presenta el diseño de mecanismos bajo una metodología donde la síntesis dimensional se realiza planteando un problema de optimización que se resuelve por un algoritmo de tipo heurístico como Evolución Diferencial o utilizando metaheurísticas. Los mecanismos han sido manufacturados y evaluados encontrándose resultados de desempeño óptimos comparados con los mecanismos diseñados por métodos tradicionales. En cuanto a dispositivos de rehabilitación de falange diseñados bajo este concepto, se encuentra el trabajo presentado en [13], que es un mecanismo de barras tipo exosqueleto que sigue la trayectoria del movimiento de F/E para un sólo dedo.



En este artículo se presenta el desarrollo de un mecanismo para rehabilitación de un dedo, que inicia con el análisis cinemático de este para obtener la trayectoria que sigue durante un movimiento de F/E y así, planteando un problema de optimización que se resuelve por un algoritmo de Evolución Diferencial, se obtiene la síntesis dimensional de un mecanismo manivela-biela-corredora (MBC) y nueve diferentes formas de interconexión de los eslabones del mecanismo, de los cuales se seleccionó la adecuada para la terapia de rehabilitación de falanges tipo efector final que se desea implementar a futuro. El mecanismo fue evaluado en un software de CAD y se realizó su implementación por un proceso de manufactura aditiva (prototipado rápido) para evaluar su desempeño.

El desarrollo del trabajo se presenta en este artículo de la siguiente manera: En la sección 2 se realiza el análisis biomecánico del dedo para la obtención de su trayectoria, en la sección 3 se presenta la generación del mecanismo MBC, finalmente se presentan las conclusiones y el trabajo a futuro en la sección 4.

Análisis biomecánico del dedo

El movimiento de flexión- extensión (F/E) de los dedos de la mano ha sido ampliamente estudiado a fin de obtener los rangos de movilidad de las uniones interfalángicas y así analizar la acción de sujeción de objetos, [6].

En el análisis biomecánico del dedo además de considerar los ángulos de movilidad de las uniones interfalángicas, también se considera que el movimiento entre estas se encuentra relacionado por una variable de proporcionalidad λ , cómo se observa en [14] y [15], por lo que al realizar el movimiento de flexión y extensión se genera una correlación entre la unión proximal interfalángica (PIF) y la distal interfalángica (DIF), la cual puede cambiar de una persona a otra.

Modelo cinemático del dedo

Debido a que la cinemática directa permite conocer la orientación y posición del efector final, en este caso de estudio el efector final es la punta del dedo, al obtener su cinemática se conseguirá generar la trayectoria que el dedo sigue cuando realiza un movimiento de F/E. El dedo cuenta con 4 grados de libertad (GDL) a partir de una unión metacarpofalángica (MCF), donde tiene 2 GDL, uno genera el movimiento abducción/aducción (θ_1) y el segundo se utiliza para generar el movimiento de F/E (θ_{MCF}). Finalmente, a las uniones DIF y PIF les corresponde un GDL a cada una, que se utilizan para completar el movimiento de F/E.

El dedo, para efectos de su modelado se puede considerar como una cadena cinemática abierta y su modelo cinemático se puede obtener por la metodología de Denavit-Hartenberg (D-H), planteando una matriz de transformación homogénea, [16]. En la Figura 1 se presentan los grados de libertad correspondientes a cada unión interfalángica, como una cadena cinemática abierta, sobre el CAD del sistema óseo de una mano real. El modelo de CAD del sistema óseo se desarrolló con el uso del software 3D Slicer [17], con el cual se realizó una primera segmentación de las falanges de la mano a partir de 539 imágenes de Tomografías Computarizadas, complementado con la separación de las falanges en el software Scan IP [18], en un proceso donde se seleccionó cada imagen en los diferentes planos que ambos programas manejan (axial, sagital y coronal), con la ventaja de que el software Scan IP permitió acercamientos para el detalle de la unión interfalángica de una manera más sencilla.

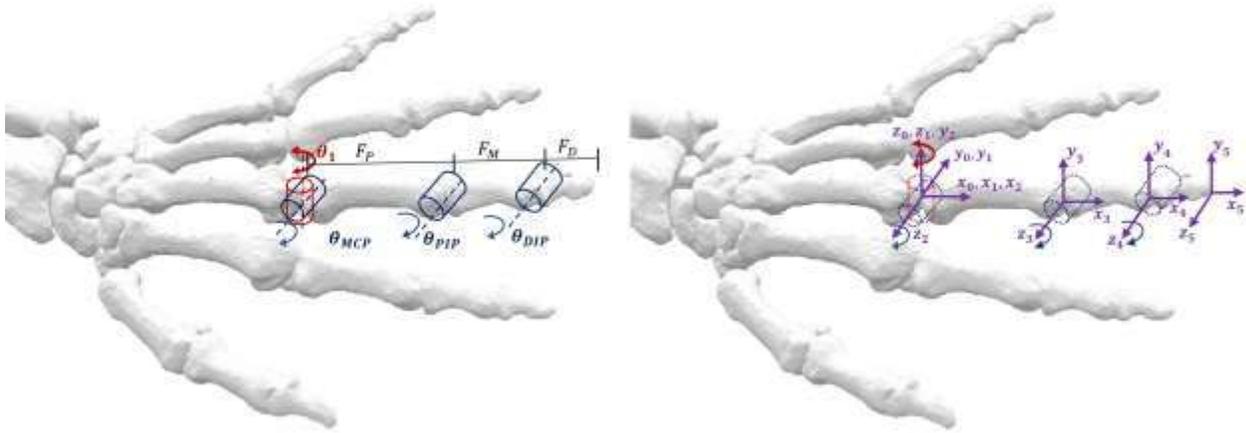


Figura 1. Representación Denavit-Hartenberg

En la Tabla 1 se observan los parámetros D-H asociados al modelo de la Figura 1, donde α_{i-1} es el ángulo que se forma entre el eje z_{i-1} y z_i con respecto al eje x_{i-1} , a_i es la distancia que existe entre sistema de referencia anterior sobre el eje x_{i-1} , el cual es el largo de las falanges que corresponden a F_P , F_M y F_D . El desplazamiento sobre el eje z_i que se podría dar entre las uniones interfalángicas es d_i , finalmente θ_i es el ángulo de movimiento que se realizará por z_i , para el caso de las manos está dado por los ángulos de unión interfalángicas que son θ_{MCF} , θ_{PIF} y θ_{DIF} para la uniones MCF, PIF y DIF. Los rangos de movilidad para este modelo fueron consultados en [19].

Tabla 1. Parámetros D-H

i	x_{i-1} z_{i-1} to z_i		z_i x_{i-1} to x_i	
	α_{i-1}	a_i	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	$\frac{\pi}{2}$	0	0	θ_{MCF}
3	0	F_P	0	θ_{PIF}
4	0	F_M	0	θ_{DIF}
5	0	F_D	0	0

La matriz de representación homogénea permite obtener la posición del efector final en los ejes x, y, z , es decir el vector (P_x, P_y, P_z) ; dado que el movimiento de abducción/aducción no se considerará inicialmente para el diseño del sistema de rehabilitación el valor para θ_1 será cero. Por lo tanto, la posición del efector final solo estará representada en los ejes x y y , determinada por las ecuaciones (1) y (2), las cuales se utilizarán para generar una trayectoria plana.

$$P_x = F_M \cos(\theta_{MCP} + \theta_{PIF}) + F_P \cos(\theta_{MCP}) + F_D \cos(\theta_{MCP} + \theta_{PIF} + \theta_{DIF}) \quad (1)$$

$$P_y = F_M \sin(\theta_{MCP} + \theta_{PIF}) + F_P \sin(\theta_{MCP}) + F_D \sin(\theta_{MCP} + \theta_{PIF} + \theta_{DIF}) \quad (2)$$

Trayectoria del dedo.

En las ecuaciones (1) y (2), se puede observar que la posición cartesiana depende de los ángulos



de las uniones interfalángicas θ_{MCF} , θ_{PIF} y θ_{DIF} . La trayectoria que sigue la punta del dedo tiene una secuencia específica para generar el movimiento, esta secuencia está determinada para las uniones DIF y PIF por la ecuación (3), donde se observa una dependencia del ángulo θ_{DIP} del ángulo θ_{PIP} y de un parámetro λ que se considera una variable. En [14] se asigna a $\lambda = \frac{2}{3}$, mientras que en [15] se indica que λ varía de una persona a otra, sin embargo, si $\lambda = 0$ significa que los ángulos de las uniones interfalángicas no están relacionados entre sí, mientras que si $\lambda = 1$ implica que los ángulos de las uniones PIF y DIF se mueven al mismo tiempo y la curva de la trayectoria se hace más cerrada.

$$\theta_{DIP} = \lambda \theta_{PIP} \quad (3)$$

Con el fin de obtener el caso más general, que incluya a la mayoría de los individuos de estudio, para la generación de la trayectoria de F/E del dedo se consideró a $\lambda = 0$. Utilizando la cinemática directa obtenida y los ángulos de movimiento reportados en [19], la curva asociada al movimiento de la punta del dedo generada se presenta en la Figura 2. Sobre la trayectoria se marcaron veinticuatro puntos que fueron utilizados como puntos de precisión para plantear el problema de optimización el cual consistió en minimizar el error de seguimiento de la trayectoria, con el fin de obtener los valores óptimos de la síntesis dimensional del mecanismo y su posición. Las coordenadas cartesianas correspondientes a los veinticuatro puntos se presentan en la Tabla 2, se puede observar en la gráfica de la Figura 2 que los puntos fueron seleccionados de manera equidistante por el movimiento de cada falange, distribuidos de forma tal que cinco puntos de precisión corresponden a la unión MCP, nueve a la unión PIP y diez a la unión DIP.

Tabla 2. Puntos de precisión sobre la trayectoria del dedo en el plano cartesiano.

	x [cm]	y [cm]		x [cm]	y [cm]		x[cm]	y [cm]		x [cm]	y [cm]
1	9.6	0	7	5.9377	-7.4647	13	1.1406	-7.6323	19	-0.5597	-5.5311
2	9.4818	-1.5018	8	5.1922	-7.8446	14	0.4389	-7.1766	20	-0.548	-5.1966
3	9.077	-3.1255	9	4.3921	-8.0892	15	-0.0466	-6.74	21	-0.4785	-4.8692
4	8.3963	-4.6542	10	3.5616	-8.1912	16	-0.2526	-6.4763	22	-0.3531	-4.5589
5	7.4606	-6.0415	11	2.7261	-8.1474	17	-0.4097	-6.1808	23	-0.1757	-4.2751
6	6.6059	-6.9612	12	1.9108	-7.9592	18	-0.5131	-5.8625	24	0	-4.0729

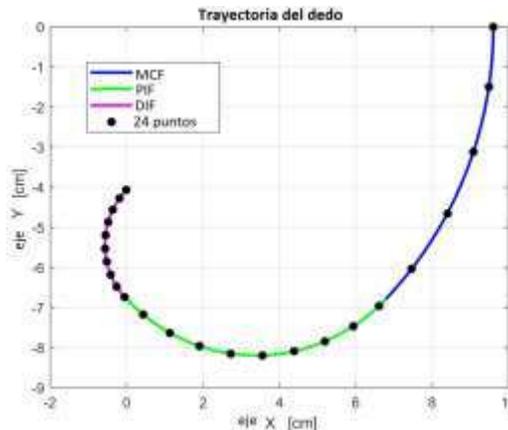


Figura 2. Trayectoria de la punta del dedo para el movimiento de F/E.

Generación del mecanismo propuesto.

Para el diseño del dispositivo de rehabilitación de falanges se eligió un mecanismo Manivela-Biela-Corredera (MBC), como el que se observa en la Figura 3, dada la facilidad que este presenta para utilizarse como un mecanismo externo. Una característica importante de los diseños de los sistemas de rehabilitación de mano es que deben ajustarse a la norma ISO 8549-1:1989 [20], en la cual se indica que un dispositivo de rehabilitación debe ser observado en todo momento. En específico, para la rehabilitación de falanges es importante considerar que estos mecanismos pueden presentar pequeños desalineamientos, por lo cual deben ser monitoreados para evitar que ocasionen lesiones en las falanges durante la terapia.

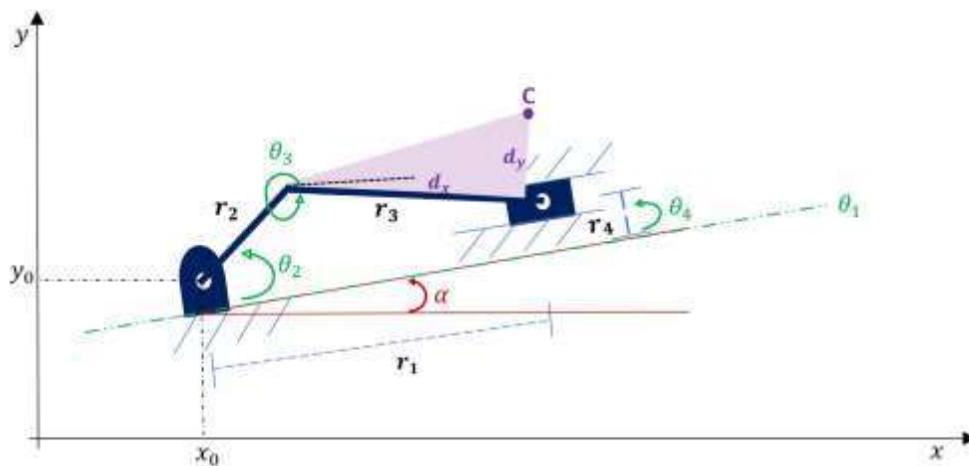


Figura 3. Elementos de un mecanismo Manivela-Biela-Corredera

Restricciones de diseño.

Dado que el análisis biomecánico indicó que el dedo debe estar en posición horizontal para realizar la terapia, el mecanismo no puede posicionarse encima de él, razón por la cual el trabajo en el primer cuadrante del plano cartesiano no fue considerado, al igual que el segundo y tercer cuadrante puesto que hacen parte del área de descanso de la mano y del antebrazo. Se determinó que el cuarto cuadrante es el que permite cumplir con la observación del movimiento de las falanges y el mecanismo no invade el área de trabajo del dedo. Por lo tanto, se definieron como restricciones de diseño los límites para el cuarto cuadrante, que están descritos por $[x_0, y_0] = [30, -30]$ cm. Además, una característica importante que fue definida para el diseño del sistema es que el mecanismo sea pequeño, con el fin de que sea agradable para el paciente, por lo cual los valores para los eslabones del mecanismo MBC fueron acotados. Observando los elementos del mecanismo presentado en la Figura 4, las dimensiones de r_2 y r_3 debe ser menores a 50 cm. El enlace ternario puede tener valores negativos debido al cuadrante en que se encuentra, por lo tanto r_4 , d_x y d_y están en el rango de -50 a 50 cm. Los ángulos para el movimiento de la manivela serán $\theta_2 = [0, 2\pi]$ rad.

Una de las principales características para el diseño de mecanismos MBC es que el sistema debe



lograr que la manivela pueda dar una vuelta completa, por ello existe una relación llamada manivela-biela en la que el radio de la manivela r_2 debe ser menor al largo de la biela r_3 , manteniéndose siempre esta relación menor a 1, como se presenta en la ecuación (4).

$$\text{relación manivela - biela} = \frac{r_2}{r_3} \quad (4)$$

De tal forma que la ecuación (5) define una relación que debe estar implícita siempre en la estrategia de diseño,

$$r_4 < (r_3 - r_2) \quad (5)$$

Adicionalmente, debido a que el problema se definió de forma secuencial, para seguir cada uno de los puntos de presión en orden es necesario establecer una secuencia de tiempo en la ecuación, como la presentada en la ecuación (6),

$$\theta_2^1 > \theta_2^2 > \theta_2^3 \dots > \theta_2^{24} \quad (6)$$

Síntesis dimensional del mecanismo.

Una vez generada la trayectoria que debe seguir el mecanismo y utilizando los 24 puntos de precisión que la describen completamente, así como su orientación para que siga la trayectoria deseada a través de un punto acoplador en el mecanismo con un mínimo error, se obtuvo la síntesis dimensional del mecanismo, es decir los valores de los elementos que conforman el mecanismo MBC, utilizando el método Santiago-Portilla [21]. Esta metodología consiste en plantear un problema de optimización a partir la cinemática directa del mecanismo y con ayuda del algoritmo de evolución diferencial [22] encontrar la posición y el tamaño de los eslabones (síntesis dimensional) que siguen la trayectoria propuesta, con el menor error de seguimiento de trayectoria (menor error del punto acoplador al pasar por los 24 puntos de precisión).

Las soluciones de diseño para el mecanismo vienen dadas en forma vectorial, descritas por un vector de diseño que se presenta en la ecuación (7),

$$\vec{p} = [p_1, p_2, \dots, p_{24}]^T = [r_1, r_2, r_3, r_4, \alpha, x_0, y_0, \theta_2^1, \theta_2^2, \dots, \theta_2^{24}]^T \quad (7)$$

Donde r_1 a r_4 , son las variables que corresponden a los tamaños de los eslabones del MBC, α es el ángulo de rotación que puede tener el mecanismo, x_0 y y_0 son las coordenadas de la posición que el mecanismo va siguiendo para generar la trayectoria, y los ángulos del θ_2^1 al θ_2^{24} son los ángulos de entrada para cada uno de los 24 puntos de precisión.

El problema de optimización se plantea como una función mono-objetivo, donde interesa minimizar el error entre los 24 puntos de precisión y la trayectoria trazada por el punto acoplador del mecanismo a generar, esta función esta descrita por la ecuación (8).

$$\min f(\vec{p}) = \sum_{i=1}^N \left[\left((C_{xd}^i) - (C_x^i) \right)^2 + \left((C_{yd}^i) - (C_y^i) \right)^2 \right] \vec{p} \in R^{31} \quad (8)$$

Donde, C_{xd}^i y C_{yd}^i corresponden a los puntos de precisión de la trayectoria del dedo (deseada), C_x^i y C_y^i son los puntos de precisión presentados por el punto acoplador del mecanismo.



Esta función está sujeta a unas restricciones de diseño de igualdad y desigualdad dadas en las ecuaciones (9) y (10),

$$g_i(\vec{p}) = \theta_2^i - \theta_2^{i+1} \leq 0, \quad i = \{1, 2, \dots, 23\} \quad (9)$$

$$g_{24}(\vec{p}) = \|r_4\| - (r_3 - r_2) \leq 0, \quad (10)$$

Y por las variables de diseño acotadas, que se presentan en las ecuaciones (11) a la (15).

$$x_0 \in [0, 30] \quad [cm] \quad (11)$$

$$y_0 \in [-30, 0] \quad [cm] \quad (12)$$

$$r_2, r_3 \in [0, 50] \quad [cm] \quad (13)$$

$$d_x, d_y, r_4 \in [-50, 50] \quad [cm] \quad (14)$$

$$\theta_2^1, \theta_2^2, \theta_2^3, \theta_2^4, \dots, \theta_2^{23}, \theta_2^{24} \in [0, 2\pi] \quad [rad] \quad (15)$$

La estrategia de optimización planteada genero 9 soluciones, es decir 9 mecanismos en diferentes posiciones con sus correspondientes síntesis dimensionales de acuerdo al valor de su función objetivo, la cual indica la exactitud que el mecanismo presenta al seguir la trayectoria del dedo. Para el caso de estudio, no se requirió elegir el mecanismo que presentó la menor función objetivo, sino el que cumplió con las restricciones de diseño ya descritas, principalmente que no invada el área de trabajo del dedo o incluso el área de descanso de la mano. Los resultados obtenidos de la solución elegida se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Síntesis dimensional del mecanismo MBC elegido.

Pieza	Medidas
Manivela (r_2)	4.64375974 cm
Biela (r_3)	13.4565227 cm
Altura de la corredera (r_4)	0 cm
Ángulo de rotación (α)	185.9557°
Eslabón terciario	$d_x = 25.0310929$ cm
	$d_y = -7.0598243$ cm
\sum error	0.19276504 cm

Cabe mencionar que además del método evolutivo, el problema de optimización también fue resuelto utilizando el método iterativo matemático SQP (Programación Cuadrática Secuencial), con el cual se encontraron 18 soluciones factibles en treinta corridas. De estas soluciones solo una presento un valor de función objetivo similar al resultado obtenido utilizando el método evolutivo (F.O.=0.1139). Aunque este caso presentaba un buen desempeño, el control deslizante del mecanismo está demasiado cerca de la posición del dedo, razón por la cual el mecanismo obtenido podría invadir el área de trabajo y es lo que se desea evitar. El segundo caso con el menor valor de función objetivo (F.O.=1.6243) dio valores de error en el seguimiento de la trayectoria mayores a los obtenidos por el método evolutivo. Finalmente, para el resto de los caso obtenidos se observó un incremento significativo del valor de la función objetivo, (caso 3 FO=3.0541 al caso18 FO=427.9388).



Del análisis realizado se dedujo que este algoritmo no presenta el mejor rendimiento para resolver el problema de síntesis dimensional del mecanismo de seguimiento de trayectoria de un dedo, dado que la variabilidad de soluciones se limitó únicamente a dos, el error de seguimiento en la mayoría de los casos es mayor al obtenido con el método evolutivo y las dos soluciones obtenidas con un menor valor de función objetivo, no permitirían la observabilidad del movimiento durante la fisioterapia asistida.

Con la síntesis dimensional del mecanismo MBC obtenida utilizando el método evolutivo, se procede a implementarlo en el software de CAD SolidWorks, donde se evalúa el comportamiento del punto acoplador ubicado en el eslabón ternario, así como se verifica la rotación de 185° para que el mecanismo siga correctamente la trayectoria deseada, como se puede observar en la Figura 3.



Figura 3. Mecanismo MBC en SolidWorks.

En la Figura 5 se observa en detalle como el mecanismo sigue la trayectoria propuesta al plantear el problema de diseño óptimo.

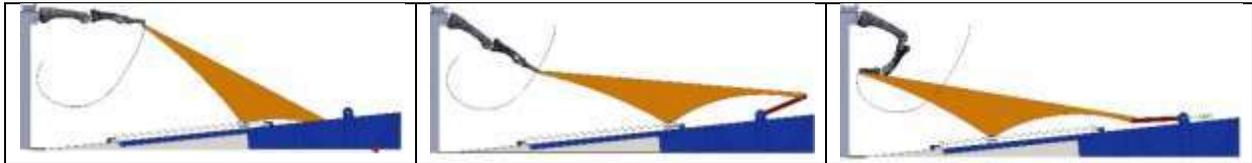


Figura 5. Desempeño del mecanismo MBC al seguir la trayectoria durante una simulación en SolidWorks.

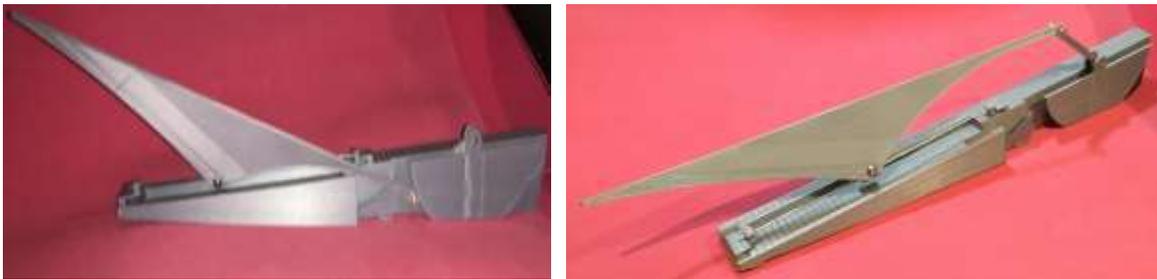
Manufactura del prototipo.

Con el mecanismo dibujado en CAD se procede a su implementación mediante la manufactura aditiva, prototipado rápido de impresión en 3D, a fin de tener una perspectiva física del mecanismo y determinar si son adecuados los elementos diseñados. La impresión de las piezas se llevó a cabo en una impresora Fullscale XT Plus de la marca MANKATI, con una densidad del 90%, un extrusor de 0.4mm y con filamento de 1.75 mm PLA, en un tiempo aproximado de 12 horas. Las piezas impresas se presentan en la Figura 6.



Figura 6. Piezas del mecanismo MBC impresas en PLA.

Para su ensamble se utilizaron tornillos de 2mm de radio, en la Figura 7 se puede observar el mecanismo acoplado. Del análisis de desempeño del prototipo se observó que la varilla de la corredera debe ser de un diámetro mayor y dado que esta pieza carga gran parte de la estructura es necesario poner especial atención en su diseño a detalle. Dentro del trabajo a futuro se realizará el diseño a detalle de cada pieza lo cual involucra un análisis de esfuerzos y deformaciones del ensamble actual y la selección adecuada del material en el que se manufacturaran cada una de las piezas que conforman el mecanismo, a partir del análisis por medio del método del elemento finito.



(a)

(b)

Figura 7. (a). Vista lateral del mecanismo MBC. (b). Vista isométrica del mecanismo MBC con un ángulo de entrada diferente

Conclusiones y trabajo a futuro.

A partir del análisis biomecánico y de la obtención del modelo cinemático se obtuvo una trayectoria natural del dedo, que puede ser aplicada a la mayoría de las personas, variando solo los parámetros de longitud de los eslabones de los dedos se pueden obtener las trayectorias para diferentes tamaños de dedos.

La metodología de diseño óptimo utilizada, permite la reconfigurabilidad del sistema y garantiza que el objetivo de diseño se alcance, determinando la mejor posición del mecanismo seleccionado y su síntesis dimensional óptima de acuerdo al objetivo de diseño, en este caso de estudio fue obtener un mecanismo capaz de seguir la trayectoria que realiza un dedo con un mínimo error de seguimiento. Comparando los resultados de la síntesis dimensional obtenida por el método de diseño óptimo con los valores del mecanismo diseñado en [4], donde se realizó el diseño mecánico a partir de la experiencia de un diseñador, los valores obtenidos por el método de diseño óptimo sin un experto en el área de diseño mecánico son similares, lo que demuestra la potencia del método utilizado y la reducción de tiempo en el proceso de diseño.

Para la implementación del mecanismo realizada por una técnica de manufactura aditiva, el prototipado en 3D, se pudo observar la operación física del mecanismo y evaluar qué sensación



podría producir en el paciente a fin de que detalles como tamaño y apariencia se definan completamente en la etapa de diseño a detalle y manufactura del dispositivo.

En cuanto a trabajo a futuro se desea adicionar al mecanismo diseñado un grado de libertad, que mediante una técnica de control para seguimiento de trayectoria y un sistema de visión se mantengan las desalineaciones naturales de las falanges de los usuarios durante las terapias, de esta forma para el paciente el uso del dispositivo sería más cómodo, no existirá riesgo de lastimarlo al forzar sus uniones interfalángicas para lograr que las falanges estén alineadas y se perderá menos tiempo en la terapia al solucionar el reiterado problema que se presenta cuando las puntas de los dedos se sueltan de los cabezales de los sistemas actuales de rehabilitación.

Referencias:

- [1] D. Leonardis, M. Barsotti, C. Loconsole, M. Solazzi, M. Troncossi, C. Mazzotti, V. P. Castelli, C. Procopio, G. Lamola, C. Chisari, M. Bergamasco, and A. Frisoli. An EMG-controlled robotic hand exoskeleton for bilateral rehabilitation. En *IEEE Transactions on Haptics*. Vol.8. No.2, p.p 140–151, abril 2015.
- [2] Y. Yun, P. Agarwal, J. Fox, K. E. Madden, and A. D. Deshpande. Accurate torque control of finger joints with ut hand exoskeleton through bowden cable sea. En *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, p.p 390–397, octubre 2016.
- [3] Amadeo. Tyromotion GmbH, 2017. 2018-01-17 [Online]. Disponible en <http://tyromotion.com/en/products/amadeo>.
- [4] J. F. Aguilar-Pereyra and E. Castillo-Castañeda. Design of a reconfigurable robotic system for flexoextension fitted to hand fingers size. En *Applied Bionics and Biomechanics*, Vol. 2016, Article ID 1712831, p.p. 1-10, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/1712831>
- [5] P. Sale, V. Lombardi, and M. Franceschini. Hand robotics rehabilitation: Feasibility and preliminary results of a robotic treatment in patients with hemiparesis. En *Stroke research and treatment*, Vol. 2012, Article ID 820931, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/820931>.
- [6] R. Balasubramanian and V. J. Santos. The human hand as inspiration for robot hand development. En *Tracts in Advanced Robotics*, Vol. 95, 2014.
- [7] R. Storn and K. Price. Differential evolution a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. En *Journal of Global Optimization*, Vol. 11, No. 4, p.p 341–359, 1997.
- [8] Kalyan Deb. An efficient constraint handling method for genetic algorithm. En *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Vol.186, p.p. 311–338, junio 2000.
- [9] S. K. Acharyya and M. Mandal. Performance of EAS for four-bar linkage synthesis. En *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 44, No. 9, p.p.1784 – 1794, 2009.
- [10] E. Vega-Alvarado, E. A. Portilla-Flores, M. B. Calva-Yáñez, G. Sepúlveda-Cervantes, J. A. Aponte-Rodríguez, E. Santiago-Valentín, and J. M. Rueda-Meléndez. Hybrid metaheuristic for designing an end effector as a constrained optimization problem. En *IEEE Access*, Vol. 5, p.p. 6002–6014, 2017.
- [11] Erkin Gezgín, Pyung-Hun Chang, and Ahmet Faruk Akhan. Synthesis of a waltz ii six-bar linkage in the design of a hand rehabilitation robot. En *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 104, p.p 177 – 189, 2016.
- [12] M. B. Calva-Yáñez, P. A. Niño-Suarez, E. A. Portilla-Flores, J. A. Aponte-Rodríguez, and E. Santiago-Valentín. Reconfigurable mechanical system design for tracking an ankle trajectory using an evolutionary optimization algorithm. *IEEE Access*, Vol. 5, p.p. 5480–5493, 2017.



- [13] A. Bataller, J. A. Cabrera, M. Clavijo, and J. J. Castillo. Evolutionary synthesis of mechanisms applied to the design of an exoskeleton for finger rehabilitation. *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 105, paginas. 31 – 43, 2016.
- [14] Duits, Roel, Egges, Arjan, van der Stappen, and A. Frank. A closed-form solution for human finger positioning. En *Proceedings of the 8th ACM SIGGRAPH Conference on Motion in Games*, MIG '15, New York, NY, USA, p.p 73–78, 2015.
- [15] D. Yoon and Y. Choi. Underactuated finger mechanism using contractible slider-crank and stackable four-bar linkages. En *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 22, No. 5, p.p. 2046–2057, octubre 2017.
- [16] M. W. Spong and M. Vidyasagar. “*Robot Dynamics and Control*”. 1989.
- [17] R. Kikinis, S. Pieper, 3d slicer as a tool for interactive brain tumor segmentation, in: 2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2011, pp. 6982-6984. doi:10.1109/IEMBS.2011.6091765.
- [18] N. Miyata, M. Kouch, M. Mochimaru, T. Kurihara, Finger joint kinematics from MR images, in: 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005, pp. 2750-2755. doi:10.1109/IROS.2005.1545611.
- [19] A. T. Velázquez Sánchez. Caracterización Cinemática e Implementación de una mano robótica multiarticulada. Tesis para obtener el Grado de Doctor en Ciencias. Instituto Politécnico Nacional, ESIME Zacatenco, 2007.
- [20] ISO/TC 168: Prosthetics and orthotics – vocabulary – part 3: Terms relating to external orthoses. Technical Report 8549-3:1989. Genova, Suiza: International Organization for Standardization; 1989.
- [21] E. Santiago-Valentín. Documento de Examen Predoctoral, requisito para obtener el Grado de Doctor en Ingeniería de Sistemas Robóticos y Mecatrónicos. Instituto Politécnico Nacional, CIDETEC, 2017.
- [22] K. V. Price, R. M. Storn, and J. A. Lampinen. *Differential Evolution-A Practical Approach to Global Optimization*, Vol. 141, enero 2005.
- [23] Papalambros, P. and Wilde, D. *Optimal Design Modeling and Computation*, 2nd ed. Cambridge Univ. Press, 2000.

Agradecimientos

Los autores P.A. Niño-Suárez, R.G. Cañizo-Rodríguez, E.A Portilla-Flores agradecen el apoyo recibido por el Instituto Politécnico Nacional de México a través de la Secretaría de Investigación y Posgrado vía los proyectos SIP y los programas de EDI y COFAA; I.A. Aguirre-Hernández y E. Santiago-Valentín agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACyT-México) por las becas otorgadas para estudios de Posgrado en ESIME-AZCAPOTZALCO-IPN y CIDETEC-IPN, respectivamente.

Los autores P.A. Niño-Suárez y E.A Portilla-Flores, agradecen a AMEXCID de la SER de México y a APC Colombia del MRE por el apoyo otorgado para la realización de esta investigación a través del proyecto “Desarrollo de prototipos robóticos para rehabilitación y prótesis”.



Aproximación al Modelamiento de Rugosidad en Superficies con Triple Curvatura en Fresado Multi-Ejes

Approximation of Roughness Modeling on Surfaces with Triple Curvature in Multiaxis Milling

Yamid Gonzalo Reyes Florez^{1,2, γ}, Ernesto Córdoba Nieto²

1. Centro Metalmecánico, SENA, Bogotá, Colombia

2. Facultad de ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

γ. Autor corresponsal: ygreyes3@misena.edu.co

Resumen

Este documento presenta el planteamiento, diseño, ejecución y evaluación experimental para el fresado de una mini-probeta con plano oblicuo como parte de un tratamiento en diseño de experimentos, usando herramienta de punto esférica y ejecutado en centro de maquinado de 3 grados de libertad, se hace énfasis en los parámetros geométricos dinámicos del maquinado, ángulo *Lead* y ángulo *Tilt*. Lo anterior con el fin de modelar rugosidad según parámetros establecidos y direccionado a explorar modelos aplicables en geometrías con triple curvatura. Como resultado se obtuvo un modelo polinomial experimental de rugosidad para condiciones de corte establecidas, de igual manera se logró desarrollar una línea base exploratoria para estimación de rugosidad esperada en superficies fresadas con triple curvatura.

Palabras clave: Rugosidad, Multi-ejes, Maquinado, *Lead*, *Tilt*.

Abstract

This document presents the approach, design, execution and experimental evaluation for the milling of a mini-specimen with oblique plane as specimen of a treatment in design of experiments, using ball end milling tool and executed in machining center of 3 degrees of freedom, Emphasis is placed on the dynamic geometrical parameters of the machining, Lead angle and Tilt angle. The above in order to model roughness according to established parameters and directed to explore models applicable in geometries with triple curvature. As a result, an experimental polynomial roughness model was obtained for established cutting conditions. Likewise, an exploratory baseline was developed to estimate expected roughness in milled surfaces with triple curvature.

Keywords: roughness, Multiaxis, Machining, Lead, Tilt

Introducción

Uno de los métodos para fabricación de engranajes cónicos con diente recto es el fresado por copiado [1], usado en pequeños lotes [2]. Según los requerimientos de la aplicación y posterior al mecanizado es posible rectificar el perfil [3] o poner en operación el engranaje directamente. Sin embargo, el perfil de los dientes posee triple curvatura, como se aprecia en la *Figura 1*, referenciados en el vector normal y plano tangente, esta característica geométrica influye en el maquinado al permitir en el fresado con tres o cuatro ejes con diferentes ángulos *Lead* y *Tilt*, ángulos que influyen, entre otros aspectos, en la rugosidad [4].

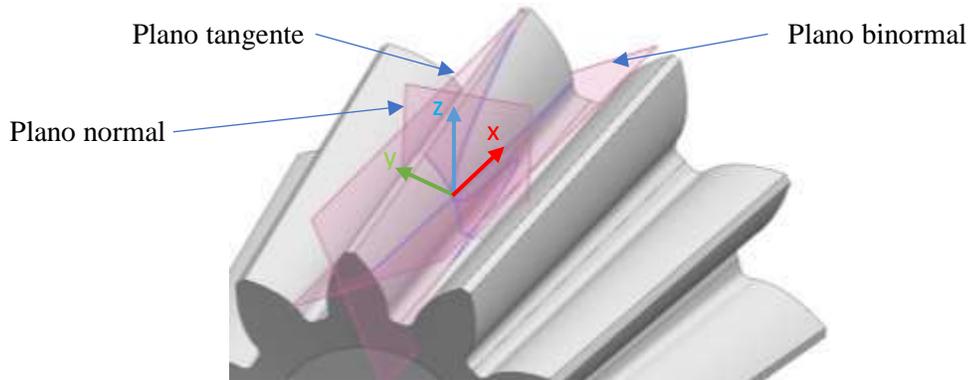


Figura 1. Triple curvatura sobre perfil involuta esférica en flanco de engranaje cónico diente recto.

La predicción por modelos matemáticos de la rugosidad en planos, planos inclinados, superficies regladas y superficies libres se han fundamentado en diseño de experimentos tratando los tres parámetros tecnológicos en operación.[5][6] Sin embargo, aspectos geométricos y cinemáticos del corte son considerados en menor medida.[7] Por tal razón este artículo propone una metódica experimental para estimación de la rugosidad en maquinado de superficies con triple curvatura considerando ángulos *Lead* y *Tilt*.

Materiales y métodos

Definición de ángulo Lead y Tilt. El ángulo Lead es la diferencia angular entre el eje de la herramienta y la dirección normal de la tangente de la superficie maquinando proyectada en la dirección del avance, el ángulo Tilt toma la definición del ángulo Lead a diferencia que la diferencia angular se toma perpendicular a la dirección del avance.

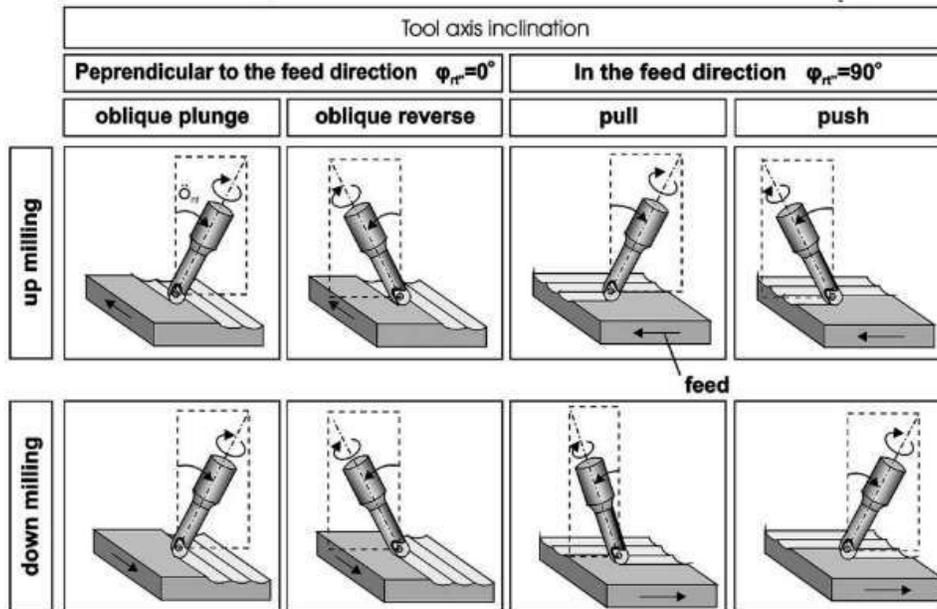


Figura 2. Definición estrategias de corte según ángulos Lead, Tilt y sentido de corte. Fuente: [8]



Bouzakis [8] en la *Figura 2* plantea ocho casos fundamentales considerando 3 factores, sentido (Up milling- discordante o down milling-concordante) [9], ángulo Tilt (Oblique plunge u Oblique reverse) ángulo Lead (Pull o Push). Por consiguiente, las estrategias de maquinado pueden tener una o dos de estas condiciones de manera simultánea.

Diseño de mini-probeta. Un plano oblicuo es seleccionado, la función (1) que define la geometría a maquinar es:

$$0 = -122.35x + 12.55y - 75.06z - 813.73 \quad (1)$$

La mini-probeta referenciada es dispuesta sobre la arista de una sección circular de diámetro 2.5 pulgadas (63.5 mm) de acero AISI 4140 bonificado. El sistema coordenado de referencia, en este caso cero de pieza, es ubicado en la mitad del espesor y en el extremo de la línea cotangente que define la cara plana, como se indica en la *Figura 3*.

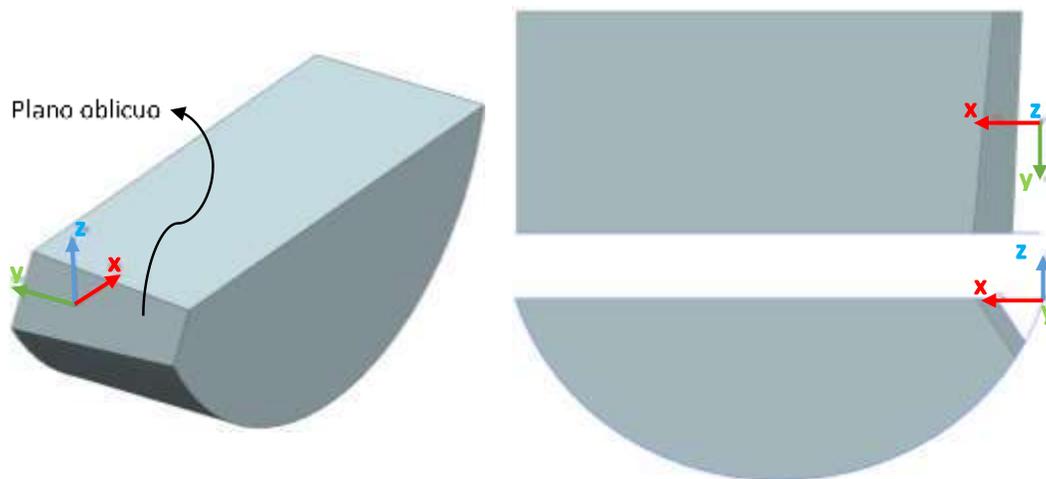


Figura 3. Posición cero de pieza en mini-probeta.

Esta geometría dispuesta en un centro de maquinado con tres grados de libertad lineales x , y , y z posibilita la fabricación con estrategias de fresado de cuatro ejes como lo plantea Bouzakis [8].

Geometría de herramienta. La herramienta de corte es una fresa cilíndrica punta esférica de diámetro 8mm marca Sandvik Coromant referencia 1B240-0800-XA 1630 con recubrimiento PVD AlCrN, la Tabla 1 dispone mayor información, haciendo énfasis en los ángulos principales de corte, el de incidencia γ y de ataque α .

Según mediciones realizadas en equipo Zoller Smile 400 el radio real de la punta de la herramienta es 3,965mm y de manera cualitativa se observa en la *Figura 4* el desgaste en los filos de la herramienta previo al maquinado experimental.



Tabla 1. Definición dimensional y geométrica de la herramienta de corte.

Característica	Símbolo	unidad	valor
Longitud total	Lt	mm	100
Longitud de corte	Lc	mm	19
Diámetro	D	mm	8
Ángulo de hélice	Ah	°	30
Ángulo de ataque	α	°	10.5
Ángulo de incidencia	γ	°	1.5
Filos	-	-	4
Diámetro sujeción	Ds	mm	8

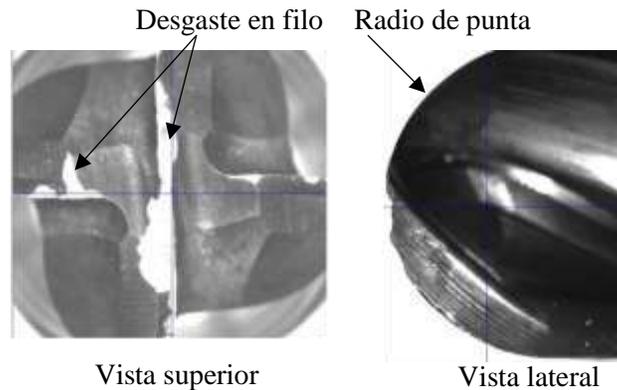
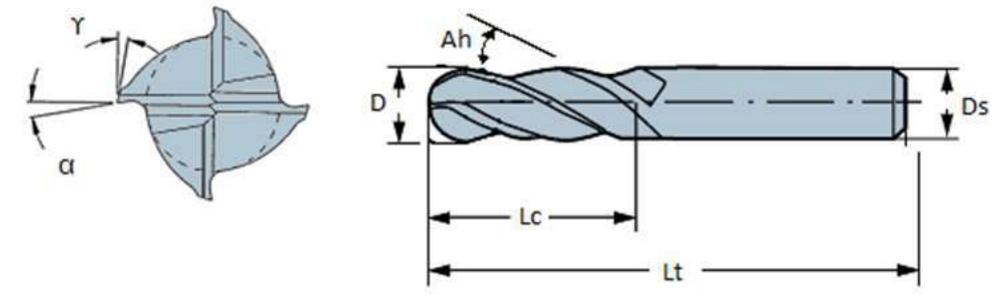
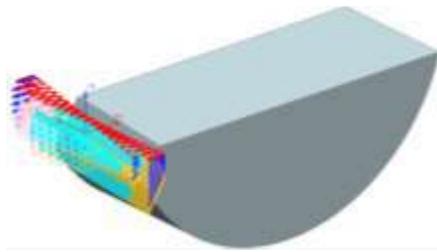


Figura 4. Punta de herramienta de corte obtenida por equipo pre-seteador Zoller Smile 400 del LabFabEx de la Universidad Nacional de Colombia.

Programación CAM (montaje tecnológico – parámetros tecnológicos). La programación CAM se realiza en NX 10 de Siemens, la primera operación programa es el desbaste, Tabla 2, todas las operaciones son programadas con herramienta cilíndrica punta esférica Ø8mm marca Sandvik Coromant Referencia 1B240-0800-XA 1630



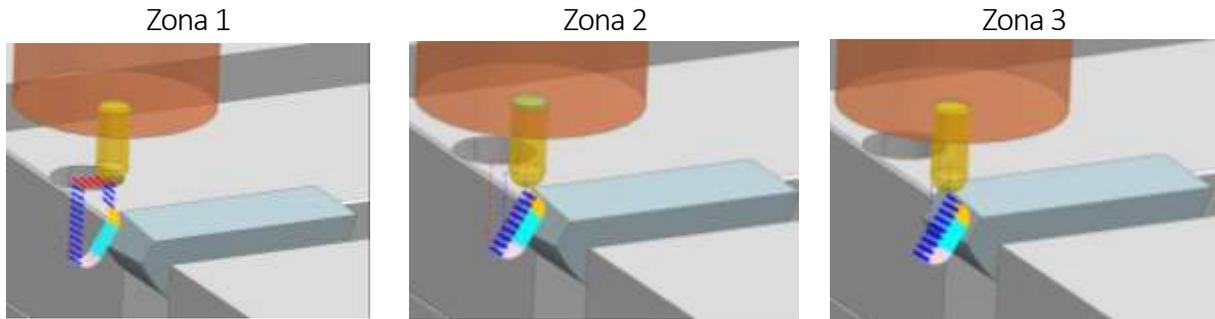
Tabla 2. Parámetros de proceso para desbaste de plano oblicuo.



Parámetros tecnológicos		
Parámetro	Unidad	Valor
Avance por diente	mm	0.0267
Profundidad por pasada	mm	0.2
Velocidad de corte	m/min	111
Sobre material dejado	mm	0.3
Tiempo	min:seg	10:51

Sobre el plano oblicuo se diseñan las tres zonas, Tabla 3, experimentales para implementar igual cantidad avances perpendiculares como superficie de estudio.

Tabla 3. Parámetros de proceso para acabado en plano oblicuo.



Zona 1	Zona 2	Zona 3
0.6	0.5	0.4
1:36	1:31	2:02

Avance perpendicular [mm]

Tiempo [min:seg]

Parámetros tecnológicos

Avance por diente: 0.02mm; Velocidad de corte 111 m/min

Ángulos Lead y Tilt. Según los establecido en la Figura 2 y para un plano oblicuo a ser ejecutado en centro de mecanizado de 3 grados de libertad lineales, se evidencian los dos ángulos Lead y Tilt. Para el caso del ángulo Tilt, que se mide en la dirección del avance perpendicular, la superficie fue inclinada 5° vistas desde la perspectiva de la Ilustración 5.

La inclinación del ángulo Lead es constante en todo el bisel y tiene un valor de 58.48°

Por lo anterior y tomando como referencia la Ilustración 2, se establece que las condiciones usadas son:

Lead: Push
Tilt: Oblique reverse
Sentido de corte: Concordante

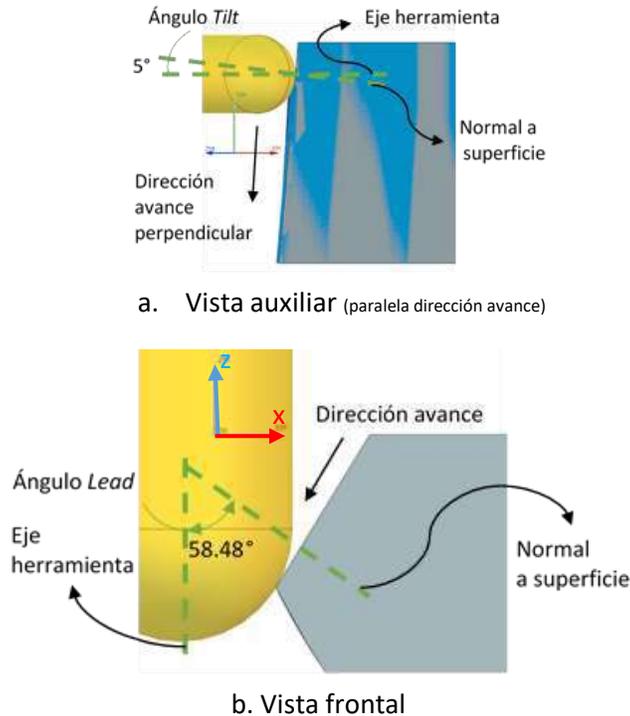


Figura 5. Ángulos Lead y Tilt presentes sobre la pieza.

Montaje experimental

El centro de mecanizado Leadwell V20 con tres grados de libertad del Laboratorio Fabrica Experimental LabFabEx de la Universidad Nacional de Colombia, la prensa Herbert HMG-6025 de mordaza fija y herramienta cilíndrica punta esférica Ø8mm marca Sandvik Coromant referencia 1B240-0800-XA 1630 son dispuestas como elementos principales del montaje experimental.

De igual manera, el cono porta herramienta es referencia BT40 para pinza ER16 y en la Figura 6 se observa el montaje experimental planteado con anterioridad, la herramienta ensamblada a la pinza y al cono y todo este conjunto al husillo de máquina. En la parte inferior la prensa en la mesa del centro de maquinado y la sujeción de la pieza de trabajo.

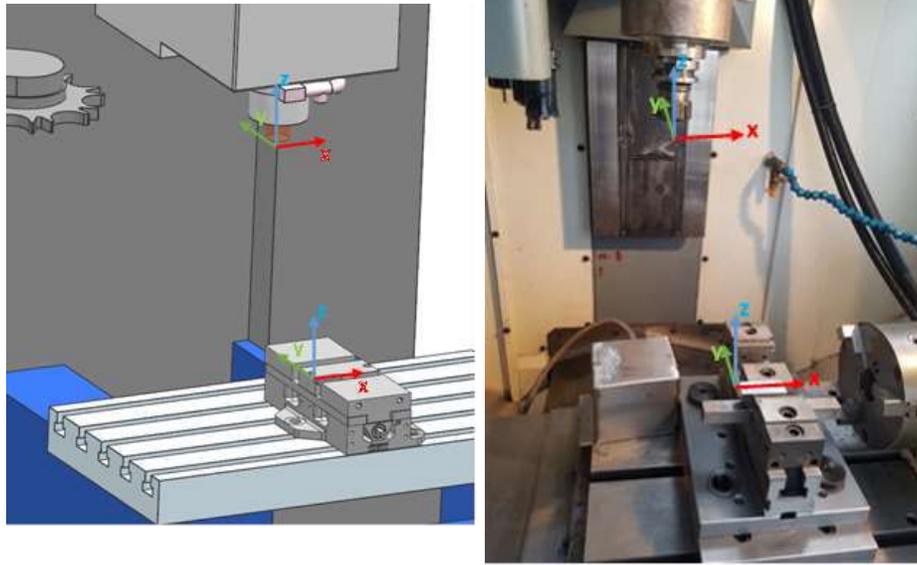


Figura 6. Montaje experimental con sistemas de referencias cero pieza y punta herramienta en IS&V y máquina real Leadwell V20 del LabFabEx de la Universidad Nacional de Colombia.

En la Figura 7 se identifica el punto de contacto teórico entre pieza y herramienta es el origen del sistema coordenado dinámico sobre el cual se evalúa el valor del ángulos lead y tilt.

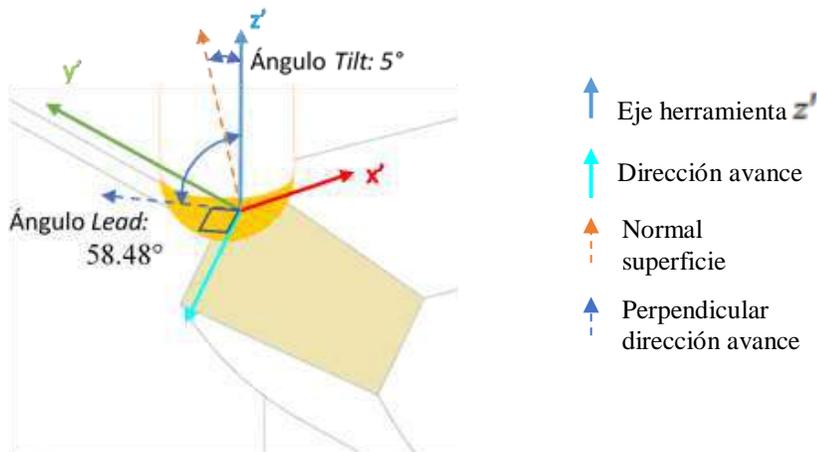


Figura 7. Sistema coordenado dinámico en el maquinado multieje.

Para el instante de la Figura 7 el ángulo Lead se referencia con el eje de la herramienta y el vector de la dirección del avance, por lo tanto el ángulo Lead es medido en el plano que contiene los anteriores vectores (plano $x'z'$). Para el caso del ángulo Tilt, el plano donde es medido contiene el vector de la dirección perpendicular al avance y el eje de la herramienta.

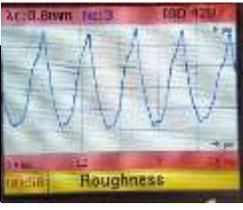
Resultados y discusión

Las tres mediciones de rugosidad, especificadas en la Tabla 4, se realizaron en el LabFabEx con el rugosímetro TESA rugosurf 10G.



Tabla 4. Resultados experimentales de rugosidad para las tres zonas de la mini-probeta.

Zona 1					
Parámetro	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio	
Ra	3.086	2.764	2.483	2.77766667	
Rq	3.494	3.092	3.327	3.30433333	
Rz	12.27	10.823	11.329	11.474	
Rp	7.555	6.489	6.666	6.90333333	

Zona 2					
Parámetro	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio	
Ra	2.327	2.641	2.808	2.592	
Rq	2.645	2.983	3.76	3.12933333	
Rz	10.158	9.725	10.455	10.1126667	
Rp	5.468	5.707	6.006	5.727	

Zona 3					
Parámetro	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio	
Ra	2.137	2.039	2.18	2.11866667	
Rq	2.483	2.376	2.51	2.45633333	
Rz	8.79	8.766	9.156	8.904	
Rp	5.171	5.02	5.199	5.13	

Para las mediciones realizadas se ha elegido una longitud básica de medición según la norma ISO 4287 [10] de 0.24mm, los demás parámetros se establecen en la Tabla 5 y la definición gráfica de cada parámetros en la Gráfica 1:

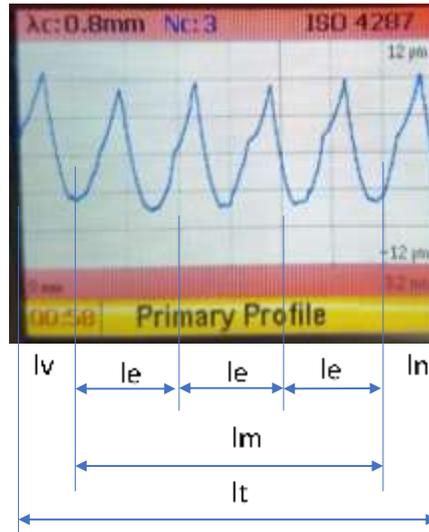
Tabla 5. Parámetros normalizados para medición rugosidad.

Parámetro	Símbolo	Valor
Tramo inicial, el palpador se pone en marcha. [mm]	<i>lv</i>	0.4
Tramo final, el palpador se detiene. [mm]	<i>ln</i>	0.4
Tramo de medición individual. [mm]	<i>le</i>	0.8
Tramo de medición. [mm]	<i>lm</i>	0.24
Longitud recorrida por rugosímetro. [mm]	<i>lt</i>	3.2

Los anteriores parámetros se definieron considerando que la longitud disponible máxima son 7mm sin tener en cuenta la transición entre zonas.

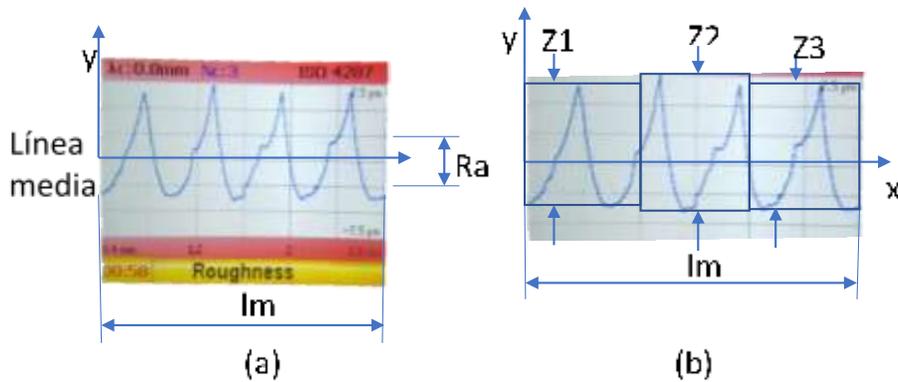


Gráfica 1. Perfil primario con especificaciones de parámetros normalizados.



Rugosidad media aritmética R_a . Está definida como la media aritmética de los valores absolutos de las coordenadas de los puntos del perfil de rugosidad en relación a la Línea Media dentro de la longitud de medición, [11].

Gráfica 2. Parámetros normalizados para medición rugosidad media aritmética (a) y rugosidad media (b)



Modelamiento:

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \quad (2)$$

Rugosidad media cuadrática R_q . Está definida como la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las ordenadas del perfil efectivo en relación a la Línea Media en un módulo de medición.



Modelamiento:

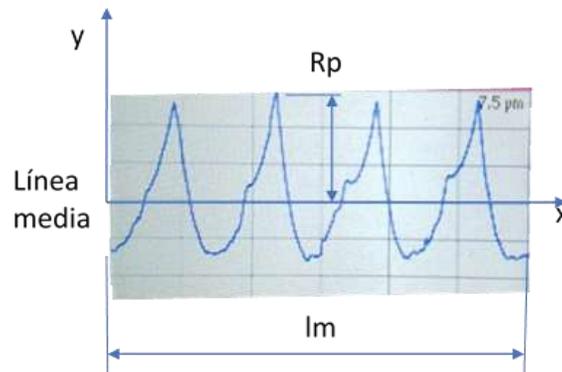
$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} y^2 dx} \quad (3)$$

Rugosidad media R_z . Es igual a la suma de las ordenadas (en valor absoluto) de los puntos más alejados de la línea media dentro de cada módulo, Gráfica 2b. y el modelamiento es:

$$R_z = \frac{1}{3}(Z_1 + Z_2 + Z_3) \quad (4)$$

Cresta mayor del perfil R_p . Distancia entre el punto más alto del perfil y la línea media.

Gráfica 3. Identificación cresta mayor del perfil R_p .



Análisis estadístico. El resultado del Análisis de Varianza se especifica en la Tabla 6 considerando la hipótesis nula como “Las medias de los grupos son iguales” e hipótesis alterna “no todas las medias son iguales”.

Tabla 6. ANOVA para rugosidad R_a por paso transversal

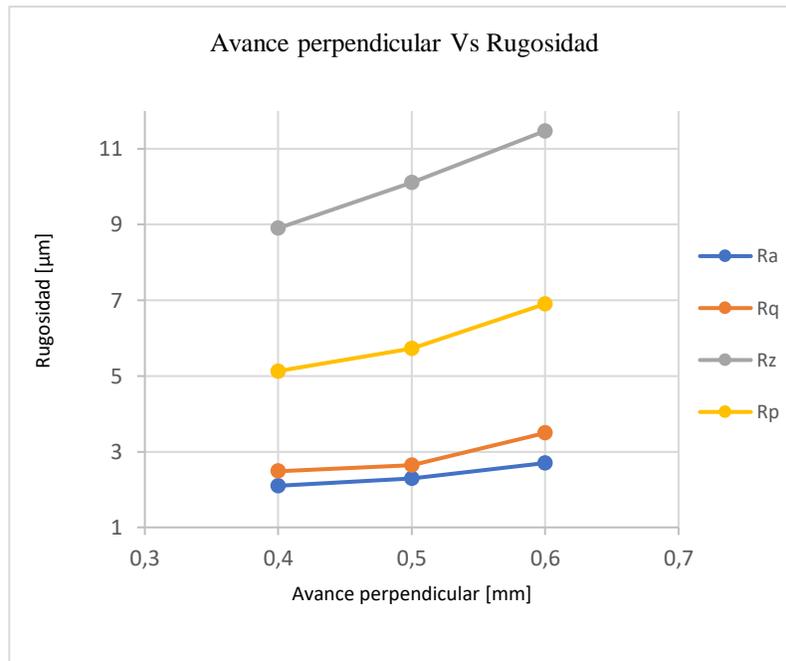
Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	P valor
Entre fuentes	2	1.6	0.83	0.04
Dentro de fuentes	6	0.94	0.5	
Total	8	2.61		

Considerando el P-valor de 0.04 es menor al nivel de significancia del 5%, se rechaza la hipótesis nula, esto se interpreta como que cada avance transversal implementado involucra un valor de rugosidad significativamente diferente.



Estimación rugosidad para caso de estudio. El caso analizado es unifactorial, es el caso más sencillo del diseño de experimentos y relaciona un factor o tratamiento con una respuesta de salida, en este caso el factor o tratamiento es el avance transversal con tres niveles 0.4, 0.5 y 0.6 mm, la variable de respuesta es la rugosidad en cuatro medidas R_a , R_q , R_z y R_p , todo en un montaje experimental ya planteado.

Gráfica 4. Relación entre el Avance perpendicular y la rugosidad para ángulo Lead push 58.48°, Tilt oblique reverse 5° y sentido de corte concordante. $F_z=0.02\text{mm}$; $V_c=111\text{m/min}$. Material: AISI 4140 bonificado



Las tendencias que se evidencian en la Gráfica 4 indican que entre menor sea el valor del avance perpendicular, es decir, entre más pasadas por unidad de longitud se realicen perpendicularmente al avance, menor será la rugosidad.

Como conclusión, un modelo polinomial experimental de rugosidad se obtuvo, para el caso de R_a se tiene:

$$R_a = 10x^2 - 7x + 3.3 \quad (5)$$

Siendo:

x : Avance transversal en mm.

R_a : Rugosidad media aritmética en μm .

Lo anterior puede aplicar cuando el ángulo lead, tilt y el sentido de corte son 58.48° push, 5° oblique reverse y concordante respectivamente

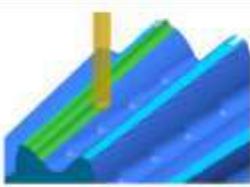
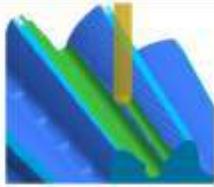
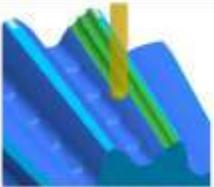
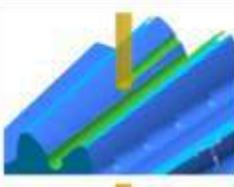
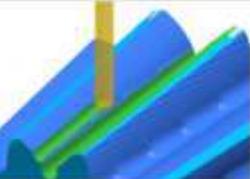
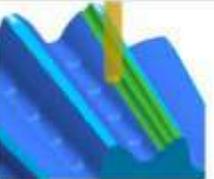
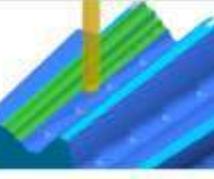
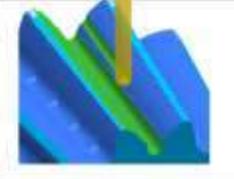


Hacia la estimación en geometrías con triple curvatura. En la sección que trata de Ángulos Lead y Tilt concluye resaltando que el ángulo Lead opera en la condición de Push, ángulo Tilt en Oblique reverse y sentido de corte Concordante. Este estudio inicial es fundamental para analizar el proceso genérico de generación de superficies maquinadas y la medición de rugosidad, de igual manera comprender los ocho casos básicos establecidos en la Figura 2.

Con base en los ocho casos y con el mecanizado del engranaje presente se establecen cuatro factores a estudiar y cada uno con dos niveles, lo cual conlleva a plantear un diseño de experimentos multifactorial.

La Tabla 6 y la Tabla 7 resumen los 16 casos para dos diseños factoriales 2^3 . Los tres factores de varianza a tener en cuenta son, ángulo Lead, ángulo Tilt y sentido de corte, cada uno posee dos niveles: pull y push, oblique reverse y oblique plunge, concordante y discordante, respectivamente.

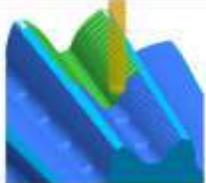
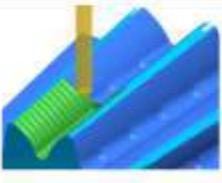
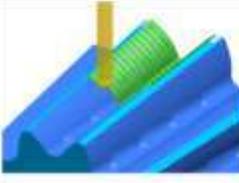
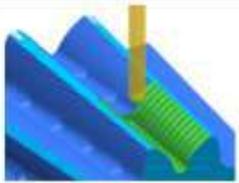
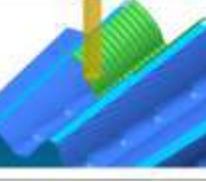
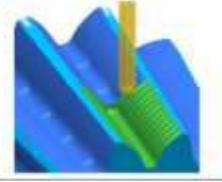
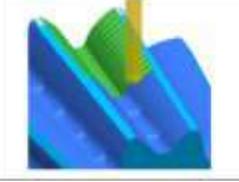
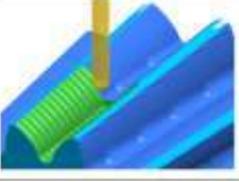
Tabla 7. Tratamientos para piñón caso longitudinal

*Sentido de giro herramienta horario		Inclinación herramienta			
		Ángulo Lead (en dirección del avance) 6.5°			
		Pull		Push	
Dirección de corte	Ángulo Tilt 46.5	Oblique plunge	Oblique reverse	Oblique plunge	Oblique reverse
	Discordante				
Concordante					

Con lo anterior se concluye una línea base para la estimación de rugosidad esperada en superficies fresadas con triple curvatura para un caso particular de ángulo *lead* y *tilt*.



Tabla 8. Tratamientos para piñón caso transversal

		Inclinación herramienta			
		Ángulo Lead (en dirección del avance) 46.5°			
*Sentido de giro herramienta horario	Ángulo Tilt 6.5	Pull		Push	
		Oblique plunge	Oblique reverse	Oblique plunge	Oblique reverse
Dirección de corte	Discordante				
	Concordante				

Referencias

- [1] S. P. Radzevich, *Dudley's Handbook of Practical Gear design and manufacture*, Third. CRC Press, 2016.
- [2] H. J. Stadtfeld, "UNIMILL for Prototype and Small-Batch Bevel Gear Manufacturing," *Gear Technol.*, no. August, pp. 70–81, 2018.
- [3] J. R. Davis, *Gear Materials, Properties, and Manufacture*. 2005.
- [4] S. Kalpakjian, "Machining Processes and Machine Tools," 2005, pp. 50–76.
- [5] A. Antoniadis, N. Bilalis, C. Savakis, E. Maravelakis, and G. Petropoulos, "INFLUENCE OF MACHINING INCLINATION ANGLE ON SURFACE QUALITY IN BALL END MILLING," no. July, pp. 8–11, 2003.
- [6] C. Efstathiou, D. Vakondios, A. Chatzikokolaki, and A. Antoniadis, "Optimal cutting conditions in ball-end milling of complex surfaces taking into account the desired surface roughness," *Int. J. Adv. Mech. Aeronaut. Eng.*, vol. 1, no. 3, pp. 126–130, 2014.
- [7] J. A. García-Barbosa, J. M. Arroyo-Osorio, and E. Córdoba-Nieto, "Influence of tool inclination on chip formation process and roughness response in ball-end milling of freeform surfaces on Ti-6Al-4V alloy," *Mach. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 1, pp. 121–135, 2017.
- [8] K. Bouzakis, P. Aichouh, and K. Efstathiou, "Determination of the chip geometry, cutting force and roughness in free form surfaces finishing milling, with ball end tools," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 43, pp. 499–514, 2003.
- [9] J. A. García-Barbosa, "Efecto de la estrategia de maquinado, en el proceso de fresado de acabado con herramienta de punta esférica, sobre la rugosidad superficial de la aleación de titanio Ti-6Al-4V," Universidad Nacional de Colombia Facultad, 2016.



- [10] ISO, “ISO1302: Geometrical Product Specifications (GPS) -- Indication of surface texture in technical product documentation,” *Iso*, vol. 1302:2002. p. 46, 2002.
- [11] E. Jeon, S. Lee, H. Song, J. Chun, and S. Kim, “STUDY FOR THE VERIFICATION OF THE TOOTH PROFILE ACCURACY OF THE AUTOMATIC GEAR DESIGN PROGRAM,” no. June, 2011.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la empresa Industrias RAMFE por su constante colaboración y participación en temas relacionados a la fabricación de engranajes. De igual manera al LabFabEx de la Universidad Nacional de Colombia por la disposición de equipos y conocimiento para la ejecución y evaluación de la investigación. Con lo anterior se concluye una línea base para la estimación de rugosidad esperada en superficies fresadas con triple curvatura para un caso particular de ángulo *lead* y *tilt*.



Implementación de un Controlador No Lineal para la Sincronización Exponencial de un Sistema Caótico

Implementation of a Nonlinear Controller for the Exponential Synchronization of a Chaotic System

Raúl Rivera Blas^{1, γ}, Salvador Antonio Rodríguez Paredes¹, Paola Andrea Niño Suárez¹, Luis Armando Flores Herrera¹, Emmanuel Zenén Rivera Blas², César Torres Martínez¹.

1. SEPI-ESIME-Azcapotzalco, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México

2. Instituto Tecnológico Superior de Alvarado, Alvarado, Veracruz

γ. Autor corresponsal: rriverab@ipn.mx

Resumen

En este artículo se realiza la implementación de un controlador no lineal en un microcontrolador ARM de 32-bit, utilizado para la sincronización de dos sistemas caóticos en configuración maestro esclavo. El controlador no lineal se diseña a partir del error y una función candidata de Lyapunov; así mismo se demuestra su convergencia a cero de manera asintótica. Las soluciones de las ecuaciones diferenciales se llevaron a cabo mediante los métodos iterativos de Euler y Runge-Kutta. Para verificar la efectividad del controlador, se compara la simulación del sistema caótico contra los resultados experimentales obtenidos de los DAC's del microcontrolador obteniéndose buenos tiempos de respuesta.

Palabras clave: Controlador no lineal, procesador de 32 bits, sistemas caóticos, estabilidad de Lyapunov, Runge-Kutta.

Abstract

In this article it's performed the implementation of a nonlinear controller into an ARM 32-bit microcontroller, used to the synchronization of two chaotic systems in master-slave configuration. The nonlinear controller is designed by means of the error and a Lyapunov candidate function; moreover its convergence to zero is proved in a way asymptotic. The solutions of differential equations were carried out by iterative methods of Euler and Runge-Kutta. To prove the effectiveness of the controller, it's compared the simulation of the chaotic system against the experimental results obtained from microcontroller's DAC.

Keywords: Nonlinear controller, 32-bits microcontroller, chaotic systems, Lyapunov stability, Runge-Kutta.

Introducción

Durante las últimas décadas los investigadores han estudiado el control y la sincronización de sistemas dinámicos caóticos los cuales tienen aplicación en diversas áreas como comunicaciones seguras [1] [2] [3], criptografía [4], aplicaciones medicas, mecanismos, etc. Así mismo, caos es un fenómeno complejo y no lineal cuya característica más importante es la extrema sensibilidad a sus condiciones iniciales. Aunque se puede tener un patrón (atractor) en el espacio de estados, es difícil conocer dónde se encontrará el atractor en un tiempo dado [5].

A pesar de que existen numerosas implementaciones de sistemas caóticos en FPGA's [6] [7], en este artículo se opta por la implementación en un microcontrolador ARM de 32-bits debido a que



es un dispositivo de bajo costo y fácil manipulación para la implementación de sistemas caóticos discretizados como en [8] [9], lo que permitiría crear aplicaciones de manera física y portátil.

Para controlar sistemas caóticos, se pueden suprimir las no linealidades o realizar una sincronización. En el primer caso se elimina el comportamiento caótico y en el segundo tendrán un mismo comportamiento. Dentro de las técnicas que se han implementado para sincronización existen; control adaptivo, control difuso, sincronización mediante filtraje y linealización por retroalimentación [10] entre otros. Este trabajo se enfoca al problema de la sincronización de dos sistemas caóticos idénticos reportados por Akgul [11], el cual consiste en diseñar un controlador que permita al sistema esclavo seguir el comportamiento caótico del sistema maestro.

Sistema Caótico de Akgul

El sistema de Akgul et. al. [11] es un sistema caótico de tercer orden sin puntos de equilibrio que se presenta en la Ecuación 1.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= ay - x + zy \\ \dot{y} &= -bxz - cx + yz + d \\ \dot{z} &= \bar{e} - fxy - x^2\end{aligned}\quad (1)$$

donde x , y , y z son los estados del sistema, a , b , c , d , \bar{e} y f son los parámetros que son constantes [11]. Sustituyendo los siguientes valores: $a=2.8$, $b=0.2$, $c=1.4$, $d=1$, $\bar{e}=10$, y $f=2$ con condiciones iniciales $x(0)=0$, $y(0)=0$ y $z(0)=0$, se obtiene el comportamiento caótico del atractor del sistema (1) en la *Figura 1*.

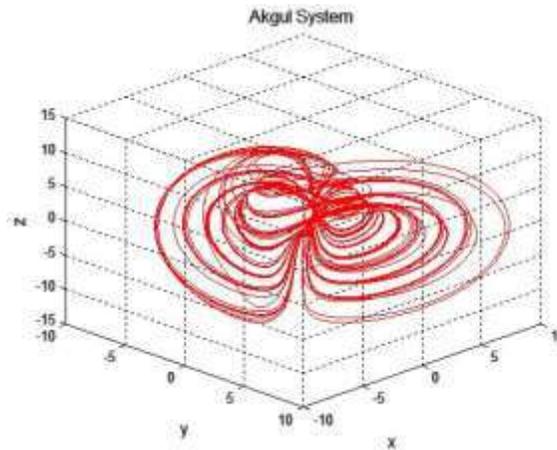


Figura 1. Atractor caótico del sistema de Akgul en el espacio de fase.

Para lograr la sincronización entre dos sistemas caóticos tipo Akgul en configuración maestro esclavo, la idea básica es eliminar de manera algebraica la no linealidad del sistema por un sistema lineal y aplicar un método de control lineal. Será necesaria la modificación del sistema esclavo mediante la adición de entradas (ley de control) seleccionadas de manera adecuada para alcanzar la sincronización, de esta manera los sistemas se definen como sigue:

$$\begin{aligned}\dot{x}_m &= ay_m - x_m + z_my_m \\ \dot{y}_m &= -bx_mz_m - cx_m + y_mz_m + d \\ \dot{z}_m &= \bar{e} - fx_my_m - x_m^2\end{aligned}\quad (2)$$



$$\begin{aligned}\dot{x}_s &= ay_s - x_s + z_s y_s + u_1 \\ \dot{y}_s &= -bx_s z_s - cx_s + y_s z_s + d + u_2 \\ \dot{z}_s &= \bar{e} - fx_s y_s - x_s^2 + u_3\end{aligned}\quad (3)$$

Los subíndices m y s denotan sistema maestro o esclavo, donde; u_1 , u_2 , u_3 son las entradas de control diseñadas de manera adecuada para que el sistema esclavo siga el comportamiento dinámico del sistema maestro cuando las condiciones iniciales de ambos sean diferentes.

Controlador No Lineal

El diseño del controlador se realiza por retroalimentación del error y la propuesta de una función candidata de Lyapunov, definido como sigue:

$$\begin{aligned}e_1 &= x_s - x_m = -e_1 + ae_2 + z_s y_s - z_m y_m + u_1 \\ e_2 &= y_s - y_m = -ce_1 + b(x_m z_m - x_s z_s) + y_s z_s - y_m z_m + u_2 \\ e_3 &= z_s - z_m = f(x_m y_m - x_s y_s) + x_m^2 - x_s^2 + u_3\end{aligned}\quad (4)$$

Proponiendo la una función de Lyapunov candidata y su derivada:

$$V := \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2 + \frac{1}{2}e_3^2\quad (5)$$

$$\dot{V} := e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 + e_3 \dot{e}_3\quad (6)$$

Sustituyendo (4) en (6) y agrupando términos como en [12] se obtiene:

$$\dot{V} = -e_1^2 + ([a - c + \{1 - b\}z_s]e_2 + u_1)e_1 + ([y_s - \{b + f\}x_m]e_3 + z_m e_2 + u_2)e_2 + ([y_m - fy_s - \{x_m + x_s\}]e_1 + u_3)e_3\quad (7)$$

A partir de (7) se deducen las leyes de control para alcanzar el objetivo $\dot{V} < 0$.

$$\begin{aligned}u_1 &= [c - a + \{b - 1\}z_s]e_2 - k_1 e_1 \\ u_2 &= [\{b + f\}x_m - y_s]e_3 - z_m e_2 - k_2 e_2 \\ u_3 &= [-y_m + fy_s + x_m + x_s]e_1 - k_3 e_3\end{aligned}\quad (8)$$

Prueba de Estabilidad

Si se sustituye (8) en (7) y se realizan operaciones para simplificar, se tiene:

$$\dot{V} := -(k_1 + 1)e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2\quad (9)$$

De la ecuación (9) se observa que si $k_1 > -1$, $k_2 > 0$, y $k_3 > 0$ entonces $\dot{V} < 0$. De acuerdo al teorema de estabilidad de Lyapunov se dice que la sincronización del error (4) converge asintóticamente a cero.

Los valores de k_1 , k_2 , k_3 son ganancias seleccionadas por el diseñador; es importante conocer que grandes valores de ganancias producirán una rápida convergencia y a su vez grandes valores en la magnitud de las señales de control u_1 , u_2 , u_3 y a pequeños valores, la magnitud de las señales de control serán menores con tiempos de convergencia más lentos. Por lo tanto, los valores seleccionados para la implementación ($k_1= 4.4317788746464$, $k_2=12.3040531814528$, $k_3= 6.7184207833897$) se tomaron del trabajo realizado en [12], donde se realiza una compensación



entre la magnitud de las señales de control y la velocidad de convergencia mediante la comparación de cuatro algoritmos inteligentes de optimización.

Implementación Experimental

El controlador se implementó en un microcontrolador ARM de 32bits basado en la tarjeta Arduino DUE®. Cuenta con 54 pines de salidas/entradas digitales (12 PWMs se pueden utilizar como salida), 12 entradas analógicas de 12 bits de resolución, 2 salidas analógicas de 12 bits de resolución, oscilador de 84 MHz, conexión USB OTG, entre otras características.

Como el sistema caótico no contiene entradas, excepto por las señales de control en el sistema esclavo para realizar la sincronización, el único material necesario es la tarjeta Arduino DUE y un osciloscopio Tektronix TDS 1001B (véase Figura 2), cuyas salidas de los estados $x(k)$, $y(k)$ y $z(k)$ se obtienen por los DAC0 y DAC1.



Figura 2. Hardware de implementación y experimentación.

La implementación se lleva a cabo al discretizar las ecuaciones de los sistemas caóticos maestro (2) y esclavo (3), ecuaciones del error (4) y señales de control (8). Para obtener el valor de los estados, se programaron los métodos de resolución de ecuaciones diferenciales ordinarias Euler y Runge-Kutta. La diferencia entre ambos métodos radica en la sencillez con que se puede programar el método de Euler, esto permite tener mayor velocidad de procesamiento pero los resultados carecen de una adecuada exactitud. Por otro lado, el método de Runge-Kutta requiere mayor número de ecuaciones, aumenta el tiempo de procesamiento (más lento), pero los valores tienen mayor exactitud. En las

Tabla 1 y Tabla 2 se aprecian porciones del código utilizado para la implementación del controlador.

Tabla 1. Código parcial del método de Euler implementado en la tarjeta arduino due.

```
float ts=0.050507627;
```

```
void loop()
```

```
{
```

```
  e1=xs-xm;
```

```
  e2=ys-ym;
```

```
  e3=zs-zm;
```

```
  u1=((c_a+(b_1)*zs)*e2)-(k1*e1);
```

```
  u2((((b_f)*xm)-ys)*e3-(zm*e2)-(k2*e2);
```

```
  u3=((f*ys)+xm+xs-ym)*e1-(k3*e3);
```

```
  xm=xm+ts*(a*y_m-xm+ym*z_m);
```

```
  ym=ym+ts*(-b*xm*z_m-c*xm+ym*z_m+d);
```

```
  zm=zm+ts*(e_bar-f*xm*y_m-xm*xm);
```



```

xs=xs+ts*(a*ys-xs+ys*zs+u1);
ys=ys+ts*(-b*xs*zs-c*xs+ys*zs+d+u2);
zs=zs+ts*(ebar-f*xs*ys-xs*xs+u3);

```

```

analogWrite(DAC0, map(zm,-15,15,0,4095));
analogWrite(DAC1, map(zs,-15,15,0,4095));
}

```

Tabla 2. Código parcial del método de Runge-Kutta implementado en la tarjeta arduino due.

Parte 1	Parte 2
<pre> void loop() { // Update erros and inputs e1=xs-xm; e2=ys-ym; e3=zs-zm; u1=((c_a+(b_1)*zs)*e2)-(k1*e1); u2(((b_f)*xm)-ys)*e3-(zm*e2)-(k2*e2); u3=((f*ys)+xm+xs-ym)*e1-(k3*e3); // Update xm,ym,zm k1xm=a*y-ym*xm+ym*zm; k1ym=-b*xm*zm-c*xm+ym*zm+d; k1zm=ebar-f*xm*y-ym*xm*xm; k1xs=a*ys-xs+ys*zs+u1; k1ys=-b*xs*zs-c*xs+ys*zs+d+u2; k1zs=ebar-f*xs*ys-xs*xs+u3; </pre>	<pre> xm=xm+ts*k1xm; ym=ym+ts*k1ym; zm=zm+ts*k1zm; xs=xs+ts*k1xs; ys=ys+ts*k1ys; zs=zs+ts*k1zs; k2xm=a*y-ym*xm+ym*zm; k2ym=-b*xm*zm-c*xm+ym*zm+d; k2zm=ebar-f*xm*y-ym*xm*xm; k2xs=a*ysaux-xsaux+ysaux*zsaux+u1; k2ys=-b*xsaux*zsaux-c*xsaux+ysaux*zsaux+d+u2; k2zs=ebar-f*xsaux*ysaux-xsaux*xsaux+u3; k3xm=a*y-ym*xm+ym*zm; k3ym=-b*xm*zm-c*xm+ym*zm+d; k3zm=ebar-f*xm*y-ym*xm*xm; k3xs=a*ysaux-xsaux+ysaux*zsaux+u1; k3ys=-b*xsaux*zsaux-c*xsaux+ysaux*zsaux+d+u2; k3zs=ebar-f*xsaux*ysaux-xsaux*xsaux+u3; k4xm=a*y-ym*xm+ym*zm; k4ym=-b*xm*zm-c*xm+ym*zm+d; k4zm=ebar-f*xm*y-ym*xm*xm; k4xs=a*ysaux-xsaux+ysaux*zsaux+u1; k4ys=-b*xsaux*zsaux-c*xsaux+ysaux*zsaux+d+u2; k4zs=ebar-f*xsaux*ysaux-xsaux*xsaux+u3; xm=xm+tsdiv6*(k1xm + 2*k2xm + 2*k3xm + k4xm); ym=ym+tsdiv6*(k1ym + 2*k2ym + 2*k3ym + k4ym); zm=zm+tsdiv6*(k1zm + 2*k2zm + 2*k3zm + k4zm); xs=xs+tsdiv6*(k1xs + 2*k2xs + 2*k3xs + k4xs); ys=ys+tsdiv6*(k1ys + 2*k2ys + 2*k3ys + k4ys); zs=zs+tsdiv6*(k1zs + 2*k2zs + 2*k3zs + k4zs); analogWrite(DAC0, map(zm,-15,15,0,4095)); analogWrite(DAC1, map(zs,-15,15,0,4095)); } </pre>

El periodo de muestreo t_s que aparece en el código de la

Tabla 1 se calculó considerando $0.1/|\lambda|_{\max}$ de acuerdo con el autor en [13]. Los valores propios dados por el sistema caótico de Akgul, se obtienen mediante (10).

$$\begin{aligned}
 f_1 = \dot{x} &= ay - x + zy \\
 f_2 = \dot{y} &= -bxz - cx + yz + d \\
 f_3 = \dot{z} &= \bar{e} - fxy - x^2
 \end{aligned} \tag{10}$$

El valor propio máximo $|\lambda|_{\max}$ es obtenido al linealizar el sistema caótico (10) por medio de la matriz jacobiana como en [14].

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} & \frac{\partial f_1}{\partial z} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} & \frac{\partial f_2}{\partial z} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x} & \frac{\partial f_3}{\partial y} & \frac{\partial f_3}{\partial z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & a+z & y \\ -bz-c & z & -bx+y \\ -fy-2x & -fx & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & z + \frac{14}{5} & y \\ \frac{z}{5} - \frac{7}{5} & z & y - \frac{x}{5} \\ -2x - 2y & -2x & 0 \end{pmatrix} \tag{11}$$



Finalmente los valores propios se encuentran resolviendo el polinomio característico

$$A = |\lambda I - J| = \begin{vmatrix} \lambda + 1 & -z - \frac{14}{5} & -y \\ \frac{z}{5} + \frac{7}{5} & \lambda - z & x \\ 2y + 2x & 2x & \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (12)$$

$$A = \lambda^3 + \lambda^2 + \frac{98}{25}\lambda \quad (13)$$

Cuyos valores son $\lambda_1=0$, $\lambda_2=-0.5+1.9157244i$, $\lambda_3=-0.5-1.9157244i$. Así $|\lambda|_{max} = 1.979898$ por lo tanto $t_s=0.050507627$.

Resultados Experimentales

En las pruebas de experimentación se tomaron los valores $a=2.8$, $b=0.2$, $c=1.4$, $d=1$, $\bar{e}=10$, y $f=2$ con condiciones iniciales $x_m(0)=0$, $y_m(0)=0$ y $z_m(0)=0$ y $x_s(0)=6$, $y_s(0)=10$ y $z_s(0)=-15$. En la Figura 3 se visualizan las salidas de los estados del controlador de manera experimental, el valor de base/div=10.0 ms significa que se implementó el método de Euler para las soluciones, mientras que el valor de base/div = 25.0 ms corresponde al método Runge-Kutta. Con esto se demuestra que el método de Euler es más rápido al ejecutarse. Pero como se deseaba mejor exactitud por el momento y no velocidad de ejecución, a partir de las figuras 4 en adelante se muestran los resultados obtenidos en simulación (software MatLab®)(columna de la izquierda) y experimentales implementados por el método de Runge-Kutta (columna(s) de la derecha).

En la Figura 4 y Figura 5 se observan las similitudes entre las señales de los estados x_m , y_m y z_m , obtenidas mediante simulación y experimentación. También se puede ver la similitud que existe entre las señales obtenidas por los estados utilizando ambos métodos.

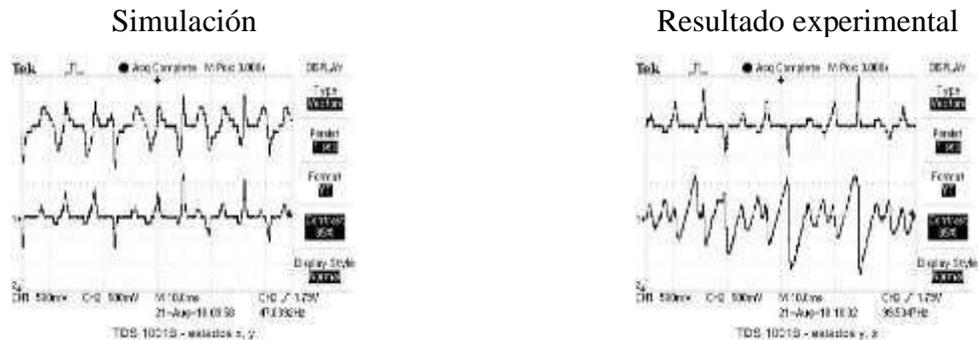
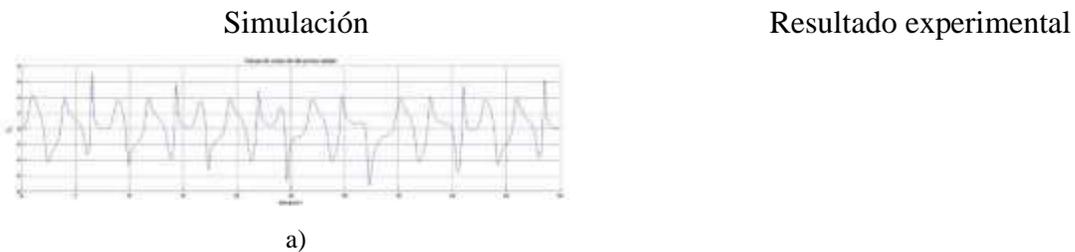
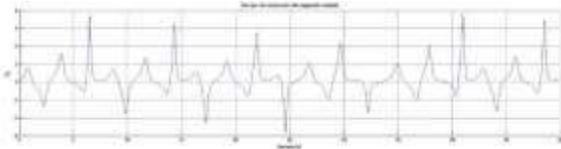
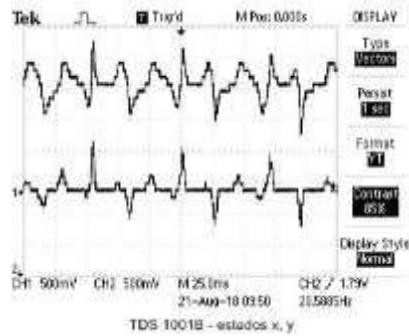


Figura 3. Salidas de los estados x_m , y_m , z_m del controlador por el método Euler.





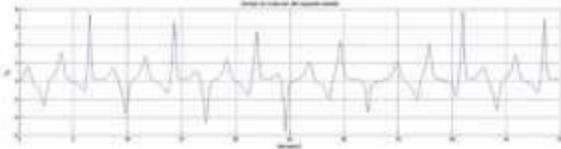
b)



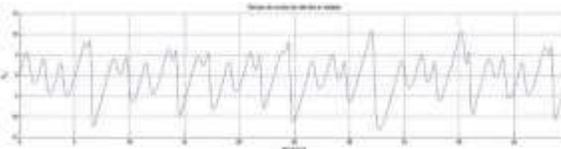
c)

Figura 4. a) Salida del estado x_m , b) Salida del estado y_m , c) Salida experimental estados x_m y y_m .

Simulación

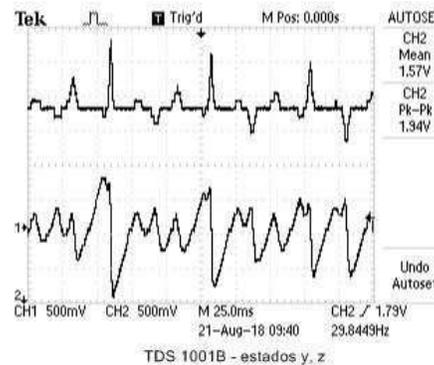


a)



b)

Resultado experimental



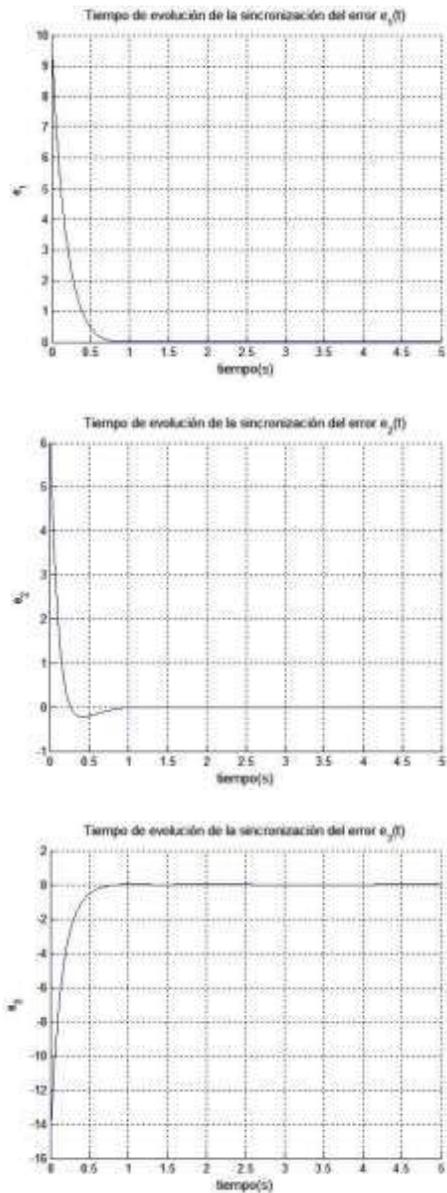
c)

Figura 5. a) Salida del estado y_m , b) Salida del estado z_m , c) Salida experimental estados y_m y z_m .

En la Figura 6, se muestra el tiempo de evolución de los errores $e_1(t)$, $e_2(t)$, $e_3(t)$ al irse sincronizando los sistemas caóticos. Para poder visualizar mejor estas señales porque sólo se aprecian en un pequeño lapso de tiempo al inicio de la ejecución, fue necesario configurar el trigger del canal 2 ó 1 del osciloscopio. La zona dentro del círculo punteado se produce al tener presionado el botón reset de la tarjeta arduino, cuando éste es liberado, empieza la ejecución del programa y por ende la salida de valores de estados, errores, señales de control por los DAC's las cuales se aprecian al lado derecho del círculo y dependerá de que par de señales se quieran visualizar.



Simulación



Resultado experimental

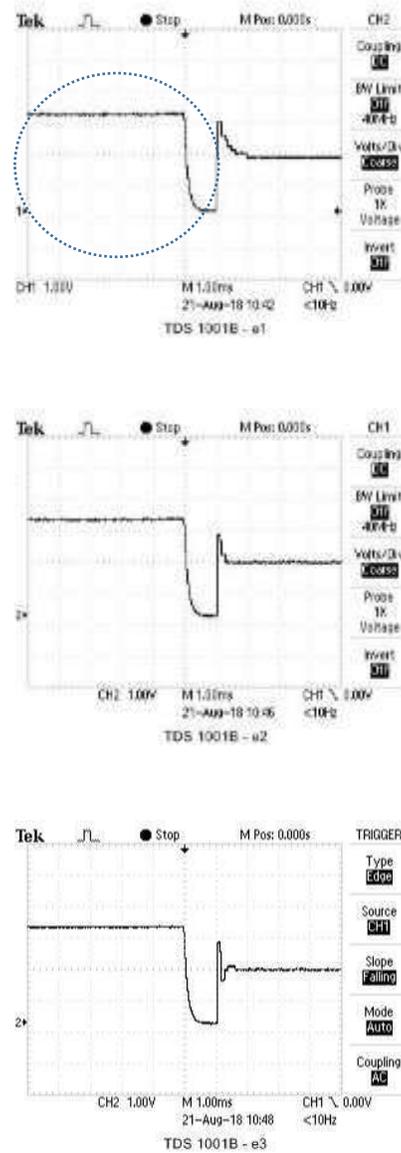
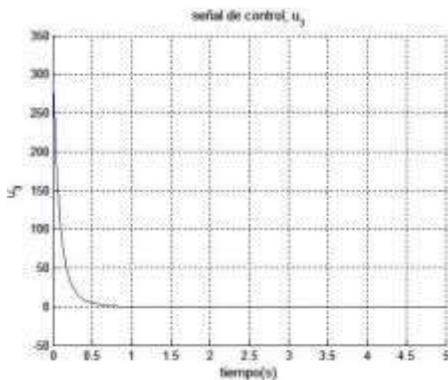
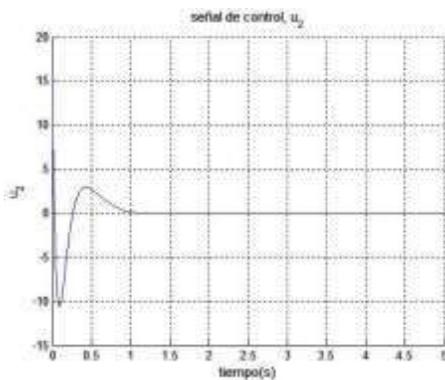
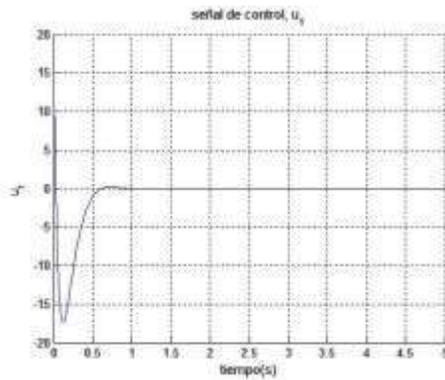


Figura 6. Tiempo de evolución de la sincronización de los errores $e_1(t)$, $e_2(t)$, $e_3(t)$.

En la Figura 7, se muestra el tiempo de evolución de las señales de control $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$ al irse sincronizando los sistemas caóticos. Se sigue el mismo procedimiento explicado en la figura 6 de mantener presionado el botón de reset para generar un disparo y poder visualizarlas. Es de resaltar la similitud que tiene el comportamiento de las señales tanto en estados, errores y señales de control.



Simulación



Resultado experimental

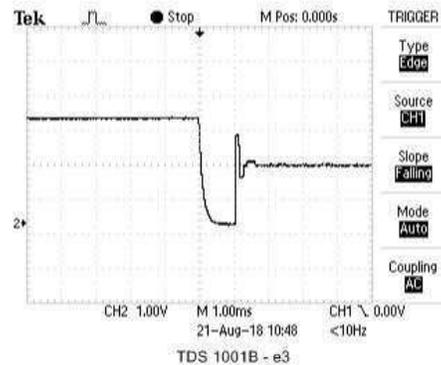
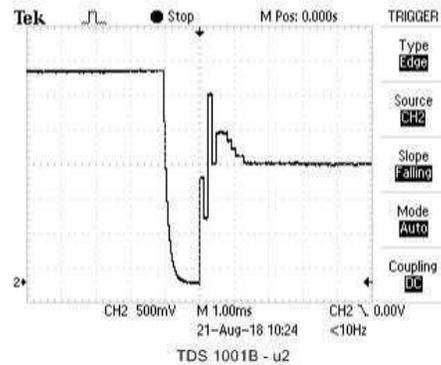
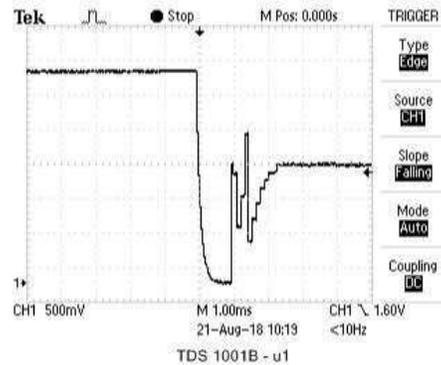


Figura 7. Tiempo de evolución de la sincronización de las señales de control $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$.

En esta Figura 8, la columna de la izquierda muestra los resultados de la simulación y la columna de en medio y derecha muestra los resultados experimentales, la única diferencia es que en la columna de en medio, los estados (maestro y esclavo) está superpuestos, mientras que en la columna de la derecha de manera intencional se desplazaron los canales con la perilla de posición vertical del osciloscopio. Esto se realizó para que se pudiera apreciar que sí existe la sincronización de los sistemas y se obtienen las mismas formas de onda en simulación que en el experimental,



sólo que en la columna de simulación, es más fácil identificar el comportamiento del estado esclavo (punteada) cuando se sincroniza con el maestro.

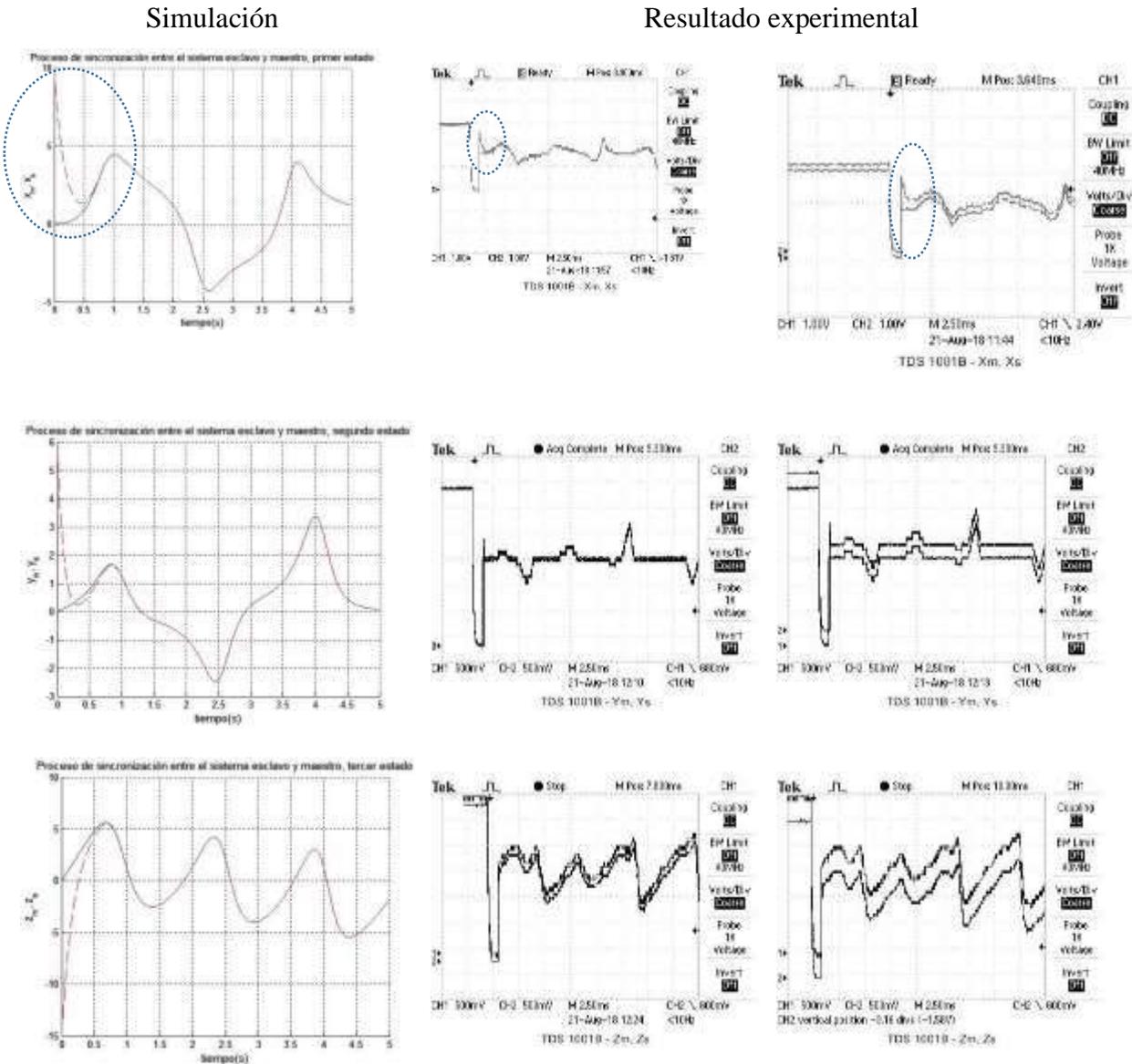


Figura 8. Tiempo de evolución de la sincronización de los estados $x_m(t)$, $y_m(t)$, $z_m(t)$, $x_s(t)$, $y_s(t)$, $z_s(t)$.

Conclusión

En este trabajo se muestra el desarrollo de un controlador no lineal para la sincronización de dos sistemas caóticos de Akgul y se demuestra su convergencia por medio del análisis de estabilidad de Lyapunov. La implementación del controlador se realizó en un microcontrolador de 32 bits con resultados favorables, el tiempo de ejecución del código que calcula el valor siguiente dependiendo del actual mediante el método de Euler es de 112 μ s y 338 μ s con el método Runge-Kutta. Esto demuestra que es factible implementar el controlador no lineal para la sincronización de los



sistemas caóticos en un microcontrolador. Se pudo observar a partir de la Figura 3, que el comportamiento de los estados, errores y señales de control son similares en simulación y en experimentación, sobre todo que sí se realiza la sincronización de manera física en tiempo real. Como trabajo a futuro se podrá implementar este y otros tipos de controladores a diferentes sistemas caóticos en un FPGA.

Referencias

- [1] F. M., «An adaptive chaos synchronization scheme applied to secure communication,» *Chaos Solitons Fract*, vol. 18, n° 1, pp. 141-148, 2003.
- [2] L. A. a. Y. V. Mauricio Zapateiro De la Hoz, «An Experimental Realization of a Chaos-Based Secure Communication Using Arduino Microcontrollers,» *The Scientific World Journal*, vol. 2015, pp. 1-10, 2015.
- [3] A. D. M. S. A. a. S. S. Camel Tanougast, «Hardware Design of Embedded Systems for Security Applications,» de *Embedded Systems - High Performance Systems, Applications*, InTech, 2012.
- [4] Y. TA., «Survey of chaotic secure communication systems,» *International Journal Comput Cognition*, vol. 2, n° 2, pp. 81-130, 2004.
- [5] T. L. C. G. A. J. a. D. J. M. Louis M. Pecora, «Fundamentals of synchronization in chaotic systems, concepts, and applications,» *American Institute of Physics*, vol. 7, n° 4, p. 821, 1997.
- [6] A. T. O. I. P. Ismail Koyuncu, «Implementation of FPGA-based real time novel chaotic oscillator,» *Nonlinear Dynamics*, vol. 77, n° 1, pp. 49-59, 2014.
- [7] E. T.-C. G. R.-G. a. L. G. d. I. F. A. D. Pano-Azucena, «FPGA-based implementation of chaotic oscillators by applying the numerical method based on trigonometric polynomials,» *AIP Advances*, vol. 8, n° 7, 2018.
- [8] M. M.-G. D. L.-M. R. Chiu, «Implementation of a Chaotic Oscillator into a Simple Microcontroller,» *IERI Procedia, Elsevier*, vol. 4, pp. 247-252, 2013.
- [9] L. A. a. Y. V. Mauricio Zapateiro De la Hoz, «An Experimental Realization of a Chaos-Based Secure Communication Using Arduino Microcontrollers,» *The Scientific World Journal*, vol. 2015, pp. 1-10, 2015.
- [10] R. E. M. A. Saeed Farzami Sarcheshmeh, «Chaotic satellite synchronization using neural and nonlinear controllers,» *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 97, pp. 19-27, 2017.
- [11] I. P. Akif Akgul, «A new three-dimensional chaotic system without equilibrium points, its dynamical analyses and electronic,» *Tehnicki vjesnik*, vol. 23, n° 1, pp. 209-214, 2016.



- [12] E. A. P.-F. P. A. N.-S. R. R.-B. J. Humberto Pérez-Cruz, «Design of a nonlinear controller and its intelligent optimization for exponential synchronization of a new chaotic system,» *Optik*, vol. 130, pp. 201-212, 2017.
- [13] F. Haugen, Model Forms and Time-Response Calculations. en *Dynamic Systems: Modeling, Analysis And Simulation*, Tapir Academic, 2004.
- [14] A. A. Ercan Kose, «Examination of the eigenvalues lorenz chaotic system,» *European Scientific Journal*, pp. 114-121, 2014.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional y a la SEPI de ESIME Unidad Azcapotzalco por las condiciones laborales proporcionadas para la realización del artículo.



Control Predictivo con Restricciones para un Sistema de Doble Tanque Acoplado

Constrained Predictive Control for a Coupled-Tanks System

Eduard Galvis Restrepo^{1, γ}, Santiago Baquero Franco¹, Andrés Jaramillo Parra¹, Carlos Torres Pinzón¹

1. Facultad de Ingeniería Electrónica, Universidad Santo Tomás, Bogotá D.C., Colombia
γ. Autor correspondiente: eduardgalvis@usantotomas.edu.co

Resumen

Este artículo está enfocado en el diseño e implementación de un controlador predictivo con restricciones para un sistema de doble tanque acoplado. Para el diseño del controlador no lineal, se incluye el modelado del sistema, el algoritmo del controlador y la implementación en un prototipo elaborado por la empresa Quanser. El controlador predictivo tiene en cuenta una función de costo, parámetros de sintonización además de las restricciones en la variable de control, para así obtener una respuesta dinámica apropiada para este tipo de sistemas hidráulicos. El trabajo presenta además una comparación entre la estrategia de control predictivo frente a la clásica estrategia de control PID.

Palabras claves: Control predictivo, doble tanque acoplado, control con restricciones.

Abstract. This paper is focused on the design and implementation of a predictive controller with constraints for a coupled-tank system. For the design of the non-linear controller, the modeling of the system, the algorithm of the controller and the implementation in a prototype made by Quanser™ are included. The predictive controller considers a cost function, tuning parameters and control variable constraints to obtain an appropriate dynamic response for this kind of hydraulic systems. The paper also presents a comparison between the predictive control strategy and the classic PID control strategy.

Keywords: Predictive control, coupled-tank, control with constraints.

Introducción

En los espacios académicos de las instituciones de educación superior donde se imparten asignaturas relacionadas con ingeniería de control, típicamente se desarrollan distintas competencias en el estudiante tales como el modelamiento de sistemas y diseños de sistemas de control retroalimentado en campos de control analógico y control digital con miras a aplicaciones de control de procesos industriales. La estrategia de control mayormente estudiada en las carreras de ingeniería es la clásica estrategia de control retroalimentado Proporcional-Integral-Derivativo (PID). El control PID, el cual fue introducido desde 1940, no es necesariamente la mejor estrategia de control que existe en la ingeniería de control; sin embargo, su popularidad en diferentes aplicaciones del control de proceso radica en su practicidad, bajo coste de mantenimiento, requerimientos de pocos dispositivos electrónicos y fácil implementación en tarjetas electrónicas o controladores lógicos programables (PLC por sus siglas en inglés). Además del control PID, existen otras estrategias de control, como las llamadas estrategias de control avanzado que han demostrado mejores desempeños en términos de seguimiento a trayectorias de referencia y a



rechazo a perturbaciones, si se comparan con los controladores PIDs, tal como se evidencia en diversas publicaciones científicas (por ejemplo de [1], [2] y [3]). A pesar de la mejoría en los índices de desempeño, dichas estrategias de control avanzado no están profundamente difundidas en el ámbito industrial, una de las causas principales es su dificultad de implementación en la práctica [3]. Las principales dificultades de implementación de estrategias como el control predictivo, algoritmos genéticos o la lógica difusa, radican en los requerimientos de infraestructura de dispositivos y la complejidad matemática que debe incluirse en los algoritmos computacionales, para implementar dichas estrategias en dispositivos electrónicos que sean fácilmente acoplados a los entornos industriales.

Particularmente, la estrategia de control avanzado llamada control predictivo, es una alternativa para sistemas de comportamiento no lineal como una planta de doble tanque acoplado y que además ofrece una mejora eficiente de la respuesta que se desea obtener en este sistema. El control predictivo ofrece la posibilidad, de predecir respuestas futuras ya previamente calculadas por un modelo y horizonte de predicción, además este controlador permite agregar restricciones y variables de sintonización al sistema, lo que da robustez al controlador. La formulación más conocida del control predictivo es la generalizada (GPC, por sus siglas en inglés), esta es una de las más utilizadas en campos industriales, pudiendo operar a plantas inestables y de fase no mínima a la vez que incorpora la idea de horizonte de control y la consideración de incremento de la señal de control.

Es importante que las instalaciones de laboratorio de las instituciones de educación superior cuenten con herramientas en el diseño de controladores avanzados que estén a la vanguardia de los sistemas industriales actuales. Además de esto, se busca que estas herramientas sean versátiles para la enseñanza del componente teórico y práctico de esta área de la ingeniería, en donde las técnicas de modelamiento de sistemas de control se ven limitadas a sistemas lineales, por lo que están expuestos a disminuir su eficiencia en sistemas que tienen variaciones paramétricas significativas alrededor del punto de operación para el cual se ha hecho el modelado y la sintonización de los parámetros del controlador.

Un sistema interesante para verificar el desempeño de diversas estrategias de control tanto lineales como no lineales, es el sistema de tanques acoplados, en este sistema se regula el nivel de agua teniendo como variable de control el flujo de líquido que se le introduce mediante una bomba controlada por una señal eléctrica de amplitud variable en el tiempo. Se pueden apreciar varias referencias técnicas donde se ponen a prueba el control de dichos sistemas hidráulicos. Particularmente, en [4], se presentó un modelo matemático en donde se fijan las restricciones del sistema y se realizan diferentes simulaciones variando los parámetros de sintonización del controlador. Así mismo, en [5] se desarrolló una estrategia de control predictivo generalizado para un sistema de tanques acoplados mostrando principalmente resultados de simulación del sistema retroalimentado. Por otro lado, para capturar la dinámica del proceso, para sistemas que trabajan con sistemas multi-variables, hay registros documentados de casos, como en [6], donde se implementa un controlador predictivo óptimo distribuido (DOMC) para cuatro tanques acoplados, en el cual el sistema general se divide en subsistemas (uno por cada tanque) y se implementa una red de comunicación local para la interacción de estos controladores. Otro ejemplo de aplicación del control predictivo aplicado a un sistema hidráulico como lo es un canal de irrigación se muestra en [7], donde se desarrolla una estrategia supervisada de control predictivo descentralizado para resolver los problemas relacionados con el cierre de canales de irrigación ante un posible escenario crítico como puede ser el vertido de contaminantes. En [7] la evaluación del desempeño del



controlador, es cumplida mediante simulación numérica en dos casos de estudio en diversos escenarios relacionados con cambios de consigna y rechazos a perturbaciones. Con relación a la enseñanza de la ingeniería de control en ambientes universitarios, en [8] se muestra una experiencia de enseñanza del control automático a estudiantes provenientes de pregrados de múltiples disciplinas como una asignatura de una maestría relacionada con el manejo de recursos hídricos, usando estrategias de control PI y predictivo.

El algoritmo de control predictivo presentado en [9] es el que se ha implementado en este artículo. El algoritmo de optimización, se basa en operaciones algebraicas de matrices para la obtención del modelo aumentado de predicción el cual incluye un polo en el origen. La ley de control se obtiene por un proceso de optimización que se realiza cada periodo de muestreo, teniendo en cuenta los horizontes de control y predicción del controlador, además de una variable que penaliza además del error medido, los cambios bruscos en la variable de control.

El artículo está estructurado de la siguiente forma: en la Sección 2 se muestra el contexto del sistema de doble tanque acoplado (modelo matemático y funcionamiento básico). El diseño del algoritmo del controlador predictivo se desarrolla en la Sección 3, mientras que en la Sección 4 se muestran resultados de simulación numérica y resultados experimentales. En la sección 5 se exponen algunas conclusiones del trabajo realizado.

Sistema de doble tanque acoplado

Para propósitos de análisis y validación práctica de desempeño de controladores en sistemas cuyo modelado es de bajo orden, en este trabajo se ha utilizado el sistema de doble tanque acoplado fabricado por la empresa Quanser. El sistema a controlar consta básicamente de dos tanques unidos por medio de un orificio por el cual pasa por acción de la fuerza de la gravedad, el líquido del tanque superior al tanque inferior. Cada tanque está equipado con un sensor de presión para medir el nivel del agua. El sistema cuenta con una bomba encargada de impulsar el agua desde el depósito de agua, el cual está ubicado en la parte inferior del sistema. Cada tanque tiene además una válvula que permite la salida de agua. En este sentido, dependiendo de cómo se configuran válvulas de salida, el agua fluye entonces hacia el tanque superior, el tanque inferior, o ambos (ver figura 1).



Figura 1. Descripción gráfica de la planta y sus componentes. Tomado de [12].

La capacidad de dirigir el flujo de agua, junto con los orificios de salida variable, permite varias configuraciones del sistema, en este sentido el sistema se puede configurar como monovariable, es



decir con una entrada y una salida (SISO por sus siglas en inglés) o como un sistema multivariado (MIMO por sus siglas en inglés). Consecuentemente, problemas retadores para el control automático, relacionados con la dinámica de fluidos, presión y retrasos de tiempo se evidencian eficazmente con este sistema.

Modelo matemático.

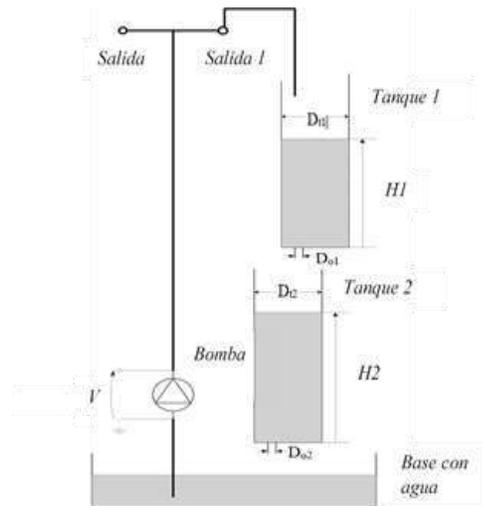


Figura 2. Diagrama del prototipo de doble tanque acoplado hecho por Quanser, tomado de [12].

El modelo matemático lineal de la planta se ha obtenido por un proceso de identificación de sistemas. El modelo se ha hallado en torno a un punto de operación particular. La relación entre la altura del nivel de fluido en los tanques $H(s)$ y el voltaje suministrado por la bomba $V(s)$, define la función de transferencia para los tanques del sistema [11], dicha relación se muestra en la ecuación 1.

$$G(s) = \frac{H(s)}{V(s)} = \frac{K_{DC}}{\tau s + 1} \quad (1)$$

Diseño del Controlador

Control Predictivo

El control predictivo (PC) es una estrategia que ofrece la posibilidad de predecir futuras respuestas con base en un modelo de predicción y una función de coste. Además, tiene la opción de sintonización de una ventana de predicción en la cual estarán ubicadas las futuras respuestas del sistema en forma vectorial. La estrategia considera variables de sintonización (parámetros de penalización y horizontes de predicción y control). El considerar las restricciones del sistema, permite a esta estrategia de control avanzada, ofrecer significativas ventajas frente a otras estrategias de control como el PID [11].

Para el diseño del controlador predictivo se tiene en cuenta un modelo matemático del sistema a controlar, el modelo ayuda a predecir la evolución futura de las variables controladas sobre un horizonte de predicción específico. En el diseño, además se considera una función de coste la cual determina el criterio de optimización. El proceso de optimización llevado a cabo por el controlador, también se consideran las restricciones, las cuales determinan los límites dentro de los cuales debe transcurrir la evolución de las señales que rigen el comportamiento del sistema. Estos límites, se determinan por el conocimiento previo de la planta y por el sistema de instrumentación y adquisición de datos. Algunas restricciones están relacionadas con los límites físicos de los actuadores y atienden a razones de seguridad expresadas por el fabricante del sistema a controlar [3].



En este trabajo se ha optado utilizar un modelo en el espacio de estados en tiempo discreto, el modelo general para un sistema lineal se muestra en las ecuaciones 2 y 3.

$$x_m(k+1) = A_m x_m(k) + B_m u(k) \quad (2)$$

$$y(k) = C_m x_m(k) \quad (3)$$

donde $u(k)$ es la variable de entrada o variable de control, $y(k)$ es la salida del sistema (variable controlada) y x_m es el vector de estados del sistema. A_m , B_m y C_m son matrices de dimensiones apropiadas. Además, se debe tener en cuenta que, debido al principio de retroceso, la entrada $u(k)$ no puede afectar la salida $y(k)$ por lo que se asume una matriz D_m igual a 0. Como se requiere obtener una predicción de la variable de control se realiza una operación diferencial a las ecuaciones de estado, para así realizar trabajar con variables incrementales de control y el vector de estado. Las variables incrementales ($\Delta u(k)$ y $\Delta x_m(k)$), se obtienen de la diferencia entre el valor actual de la variable y el valor de su estado anterior (un periodo de muestreo previo).

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad (4)$$

$$\Delta x_m(k) = x_m(k) - x_m(k-1) \quad (5)$$

Para incorporar $\Delta x_m(k)$ en la salida $y(k)$, también es necesario realizar un nuevo vector de estado que comprenda el cambio de la variable x_m . Las ecuaciones de estado para el modelo aumentado se muestran en las ecuaciones 6 y 7.

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & \\ C_m A_m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ C_m B_m \end{bmatrix} \Delta u(k) \quad (6)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} C \\ o_m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

El bloque del controlador incluye un optimizador, el cual se encarga del cálculo numérico de la variable de control óptima basado en el valor de las salidas predichas del sistema, las cuales se obtienen a partir del modelado matemático del sistema. la ventana de tiempo para la realización de la optimización está descrita en una ventana de tiempo determinada por el horizonte de predicción N_p . La trayectoria de la señal de control futura está dada por un parámetro llamado horizonte de control N_c . La forma general de la ecuación de la trayectoria de control queda descrita como sigue:

$$\Delta u(k), \Delta u(k+1), \Delta u(k+2), \dots, \Delta u(k+N_c-1) \quad (8)$$

Se define una variable k para el tiempo discreto y se sustituye para todas las variables de salidas predichas. La variable controlada y la variable de control predichas para un periodo de tiempo determinado por el horizonte de predicción, están dadas por los siguientes vectores:

$$Y = [y(k_i+1|k_i) \ y(k_i+2|k_i) \ y(k_i+3|k_i) \ \dots \ y(k_i+N_p|k_i)]^T \quad (9)$$



$$\Delta U = [\Delta u(k_i) \Delta u(k_i + 1) \Delta u(k_i + 2) \dots \Delta u(k_i + N_c | k_i)]^T \quad (10)$$

La ecuación de predicción de la variable de salida, escrita en forma matricial es la siguiente:

$$Y = F x(k_i) + \phi \Delta U \quad (11)$$

Por otro lado, la función de coste tiene como objetivo principal la reducción al mínimo del error entre la variable controlada y el valor de consigna y además penalizar cambios bruscos en la variable de salida del ΔU . La función de coste es por tanto:

$$J = (R_s - Y)^T (R_s - Y) + \Delta U^T R \Delta U. \quad (12)$$

donde R_s es el vector de entrada, asumiendo que el valor de la consigna no cambia a lo largo de un horizonte de predicción. Por su parte, R es la matriz de penalización de la variable de control, cuya dimensión depende del horizonte de control, N_c . R es una matriz identidad multiplica por un parámetro adimensional de penalización, R_w .

Para encontrar el valor óptimo de ΔU es necesario hacer una minimización de la función de coste. Para el caso particular del controlador predictivo que no considera restricciones, la solución óptima para la señal de control se obtiene derivando a J con respecto a ΔU e igualando el resultado a cero, lo cual arroja la siguiente ecuación:

$$\Delta U = (\phi^T \phi + R)^{-1} \phi^T (R_s - Fx(k_i)) \quad (13)$$

Cabe mencionar que las restricciones tenidas en cuenta en el proceso de optimización, se utilizan principalmente para regular los valores máximo y mínimo del controlador, la velocidad de cambio en amplitud de la acción de control. Para tener en cuenta las restricciones en el diseño del controlador, es necesario resolver un problema de programación cuadrática para la función de coste del controlador. Las restricciones se expresan como desigualdades para el cambio de la variable de control y para sus límites en cuanto a su magnitud. El problema de optimización cuadrática a resolver, en el cual se minimiza a la función de coste, J , con respecto a variable de control, ΔU , se expresa en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \min J &= \frac{1}{2} \Delta U^T H \Delta U + \eta \Delta U^T f \\ \text{sueto a: } & A \cdot \Delta U \leq b \end{aligned} \quad (14)$$

donde H y f son las matrices de dimensiones apropiadas que dependen de la variable de control, ΔU . A y b serán las matrices que contendrán la información de las restricciones del sistema. El tamaño de ΔU está dado por el horizonte de control y este a su vez determina el tamaño de A . la matriz b , contendrá los rangos de la desigualdad que se quieren incorporar al sistema.

En el presente trabajo, la implementación práctica de la solución numérica del problema de optimización dado en (14), ha utilizado el algoritmo computacional de *Hildreth* planteado en [9].



Control Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

La estrategia de control PID es una estrategia de control retroalimentado ampliamente utilizada en diferentes aplicaciones de control de procesos industriales. En el enfoque PID, la variable de control es calculada en base al error medido que entre la consigna y el valor de la variable controlada en un instante de tiempo determinado. El controlador PID propuesto en este trabajo, tiene una estructura en paralelo con un solo grado de libertad. La ecuación que describe el controlador en tiempo discreto implementado es la siguiente:

$$\frac{U(z)}{E(z)} = K_P + K_i \cdot T_s \frac{1}{z-1} + K_d \cdot \frac{1}{T_s} \frac{z-1}{z} \quad (15)$$

donde $U(z)$ es la señal de control, $E(z)$ es la señal de error y K_P , K_i y K_d son las ganancias proporcional, integral y derivativa respectivamente. El parámetro T_s representa el periodo de muestreo

Resultados y Análisis

En el desarrollo del presente trabajo, después de diseñar la estructura del controlador, se ha procedido a realizar una simulación numérica en Matlab/Simulink, posteriormente se ha implementado el controlador en el prototipo experimental desarrollado la empresa Quanser [12]. En la simulación del sistema de control en lazo cerrado, se ha utilizado el modelo de la función de transferencia del sistema suministrado en el manual de usuario. El desempeño del controlador en lazo cerrado se ha evaluado analizando la respuesta ante cambios de consigna y la capacidad de rechazar perturbaciones no medibles. Los resultados numéricos de la comparación del desempeño de 4 controladores diferentes (predictivo sin restricciones, predictivo con restricciones, el bloque MPC toolbox de Matlab y PID) se muestran en la figura 3.

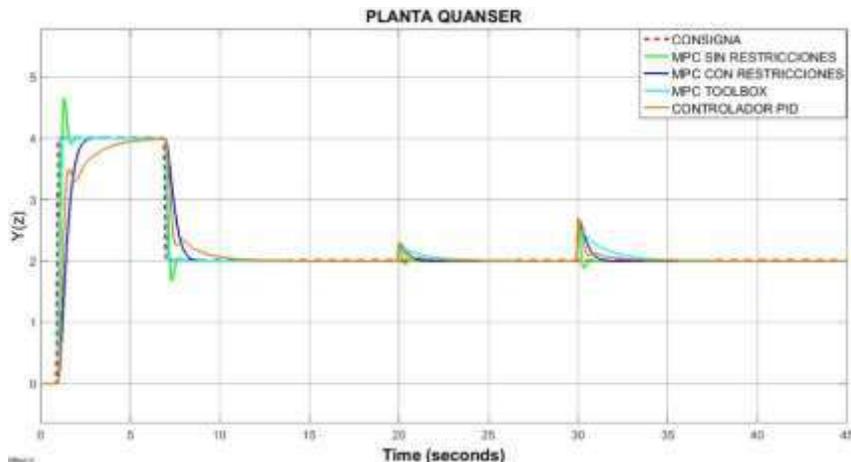


Figura 3. Resultados de simulación de sistema con 4 controladores.

En la parte experimental, la planta utilizada en el presente proyecto ofrece tres tipos de configuraciones, permitiendo de esta manera realizar el control de nivel sobre el tanque superior o sobre el tanque inferior, con suministro de agua por parte de la bomba para un solo tanque o para ambos. Como resultado de la simulación y el análisis del desempeño de los controladores, se opta por implementar el controlador predictivo con restricciones que es el que mejor se comporta como



se puede apreciar en la figura 3. En la configuración del experimento de laboratorio, el sistema se configura con una entrada y una, así que la ley de control se aplica únicamente sobre el tanque 1. La figura 4, por su parte muestra el comportamiento del nivel de agua en el tiempo considerando los siguientes parámetros de sintonización: $N_c=10$; $N_p=200$; $R_w=0.1$ y $U_{max}= 10 \text{ cm}^3/\text{s/V}$. Los valores de los horizontes de control fueron elegidos a partir de un análisis de la respuesta al escalón del sistema en lazo abierto. En los experimentos, se ha tenido en cuenta un periodo de muestreo, $T= 0,2 \text{ s}$.

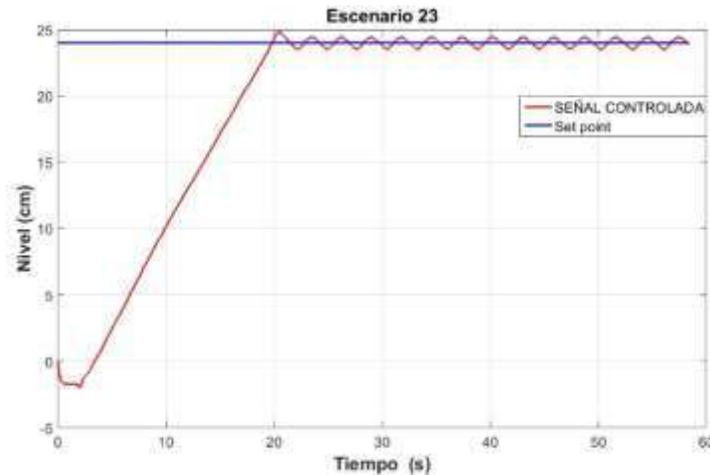


Figura 4. Variable de salida experimentalmente obtenida con el control predictivo

Una comparación entre el desempeño del controlador predictivo y un controlador PID en la misma configuración. El valor del parámetro R_w fue obtenido normalizando la función objetivo con el valor estimado permitido máximo (MAVE, por sus siglas en inglés) del cambio de voltaje que se aplica al actuador, se ha seguido el procedimiento de sintonización planteado en [6]. Los parámetros de sintonización del controlador PID discreto fueron obtenidos a partir de la herramienta de sintonización automática de Matlab/Simulink. Para los experimentos se han utilizado los valores de 7,0; 1,66 y 0,025 para K_p , K_i y K_d respectivamente. Para la elaboración de los escenarios para validar del desempeño del sistema controlado, se tuvo en cuenta el rechazo a perturbaciones y además el seguimiento a los cambios de la señal consigna durante un tiempo de 1 minuto. Las figuras 5 y 6 muestran, los valores del nivel de agua en dos escenarios diferentes con el objetivo de comparar el desempeño de dos controladores (PID y Predictivo). Particularmente, en el escenario 6 se ha provocado una pequeña perturbación en el tiempo de 26 s aproximadamente.

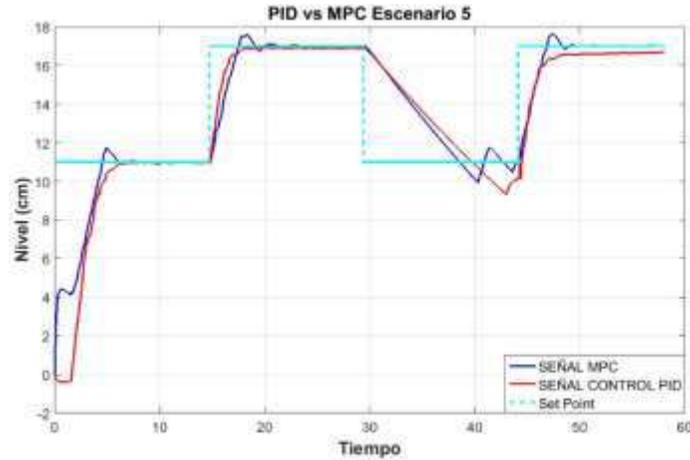


Figura 5. Variable de salida en resultado experimental

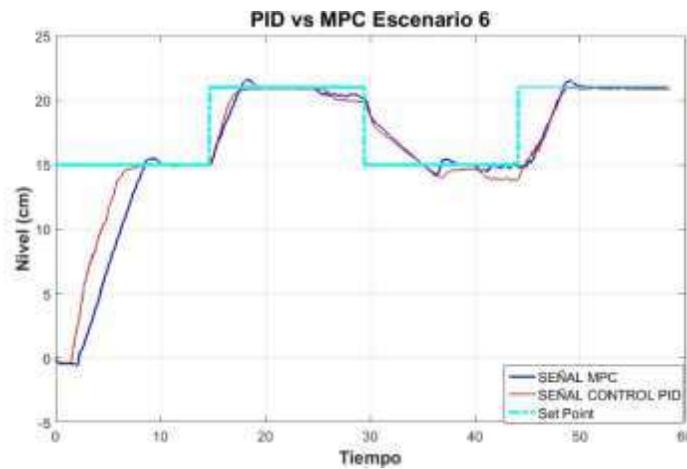


Figura 6. Variable de salida en resultado experimental

Se puede observar que los dos controladores ofrecen un desempeño positivo para cada uno de los escenarios, pero analizando las respuestas a los cambios de consigna y perturbaciones se observa que el controlador predictivo ofrece un mejor desempeño. Considerando como parámetro de comparación la rapidez de respuesta del controlador, el PID ofrece una respuesta más rápida que la del controlador predictivo en el estado transitorio y hasta el punto de paso por el 90% del valor de consigna; sin embargo, posteriormente en el estado estacionario se observa como el controlador predictivo iguala o incluso en algunos escenarios supera la velocidad de respuesta del PID. Cabe mencionar que se ha dejado un valor pequeño en la variable de control U_{max} para así asegurar un error en estado estacionario menor al 5%, lo que hace que la bomba no suministre agua con la misma potencia posible, tal y como ocurre con el sistema controlador por la estrategia PID.

La cuantificación del error para estos dos controladores se realizó mediante los métodos de RMSE (Root Mean Square Error), el cual es una forma de cuantificar el error por medio de una estimación que mide el promedio de los errores al cuadrado y MAPE (Mean Absolute Percentage Error) el cual es una medida de la precisión de predicción de un método de pronóstico en las estadísticas para el error de los controladores. Las ecuaciones que describen estos dos métodos de cuantificación de error están definidas de la siguiente manera [6]



$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (Y_k - \hat{Y}_k)^2} \quad (15)$$

$$MAPE = \frac{100}{N} \sqrt{\sum_{k=1}^N \left| \frac{Y_k - \hat{Y}_k}{Y_k} \right|} \quad (16)$$

Donde N es la cantidad de muestras, Y_k es el valor teórico que en este caso sería el valor de consigna y \hat{Y}_k es el valor medido. La tabla 1 muestra los valores cuantificados de la señal de error para dos escenarios experimentales.

Tabla 1. Cuantificación de la señal de error

		RMSE (cm)	MAPE
Escenario	Controlador		
Escenario 5	MPC	3,1797	0,1002
	PID	0,8420	0,128
Escenario 6	MPC	2,2851	0,1326
	PID	1,9457	0,1077

Conclusiones

En este artículo se ha mostrado el diseño e implementación de una estrategia de control predictivo para un sistema de doble tanque acoplado. El algoritmo implementado considera restricciones en el actuador del sistema. También se implementó un controlador PID para realizar una comparación de desempeño frente al controlador predictivo. Mediante el resultado de las pruebas experimentales, se observó que el controlador PID solo tiene un desempeño superior en términos de seguimiento a una señal de referencia, para una de las tres configuraciones que se pueden lograr con la planta de la empresa Quanser®. Cabe mencionar que, en las pruebas de campo realizadas en las otras dos configuraciones, se produjo desbordamiento de agua debido a los significativos porcentajes de sobre-elongación de la respuesta en estado transitorio.

En la configuración del sistema retroalimentado implementado en el laboratorio, se observan desempeños aceptables por parte de los dos controladores (MPC & PID), pero en la cuantificación de los errores se observa que el controlador predictivo tiene una mejor disminución de error y mayor rapidez en su respuesta. Finalmente, se puede evidenciar un ahorro energético notable con el uso de la estrategia de control predictivo debido a la posibilidad de restringir el valor máximo de la acción de control, en razón a que no se tiene operando el actuador al 100% de su capacidad energética por largos periodos de tiempo.

Gracias a los resultados experimentales y de simulación obtenidos con este trabajo, se ha posibilitado a estudiantes de ingenierías electrónica, mecánica y telecomunicaciones de la Universidad Santo Tomás en Bogotá a la realización de prácticas de control aplicado utilizando la planta Quanser aquí descrita. Como resultado de este trabajo, se ha dejado una guía de laboratorio amigable con el usuario para el desarrollo de prácticas relacionadas con controladores PID y Predictivo, en la cual los estudiantes de asignaturas relacionadas con el control de procesos, pueden identificar las diferencias y los desafíos en cuanto a la implementación que supone cada una de las



estrategias de control descritas en este artículo. Dentro de los comentarios recogidos a estudiantes que han usado los resultados obtenidos de este trabajo, algunos han comentado que gracias a la practicas han profundizado los conocimientos teóricos adquiridos en clase y además han desarrollados habilidades para la implementación de controladores digitales que se utilizan actualmente en la industria. Como trabajo futuro se considera continuar validando la estrategia de control predictivo en otras plantas (hechas por el mismo fabricante) tales como un péndulo invertido, un control de posición angular y un sistema de “ball and beam”.

Agradecimiento

El desarrollo de este artículo fue apoyado por la Universidad Santo Tomás, mediante la convocatoria interna de proyectos de investigación, FODEIN 2018, a través del proyecto con código 1854505.

Referencias

- [1] S. J. Qin and T. a. Badgwell, “A survey of industrial model predictive control technology,” *Control Eng. Pract.*, vol. 11, no. 7, pp. 733–764, Jul. 2003.
- [2] A. Bemporad, M. Morari, V. Dua, and E. N. Pistikopoulos, “The explicit linear quadratic regulator for constrained systems,” *Automatica*, vol. 38, no. 1, pp. 3–20, Jan. 2002.
- [3] D. Mariagrazia, F. Alexander, M. Marek, and S. Carla, “A Survey on Advanced Control Approaches in Factory Automation,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 394–399, 2015.
- [4] J. P. González and N. Toro, “Control predictivo generalizado implementado a dos tanques acoplados,” *Sci. Tech.*, vol. 3, no. 32, Jan. 2006.
- [5] J. R. Llata, J. P. Oria, E. G. Sarabia, J. Arce, and A. Robles, “Control predictivo de tanques acoplados.”
- [6] F. D. J. Sorcia-Vázquez, C. D. Garcia-Beltran, G. Valencia-Palomo, G. Guerrero-Ramírez, M. Adam-Medina, and R. Escobar-Jiménez, “Control Predictivo Distribuido Óptimo Aplicado al Control de Nivel de un Proceso de Cuatro Tanques Acoplados,” *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind. RIAI*, vol. 12, no. 4, pp. 365–375, Oct. 2015.
- [7] E. Galvis, “Predictive control with dynamic constraints for closure and opening operations of irrigation canals,” PhD Dissertation. Technical University of Catalonia, Barcelona, Spain., 2016.
- [8] J. Mantecon, M. Gomez, and J. Rodellar, “Teaching control of irrigation canals to non system engineers,” *Int. J. Eng. Educ.*, vol. 26, no. 6, pp. 1405–1413, 2010.
- [9] L. Wang, *Model Predictive Control System Design Implementation Using Matlab*. London: Springer, 2009.
- [10] A. Gómez and J. Castillo, “Definición de estándares operativos para tanques atmosféricos y vasijas de almacenamiento de líquidos a presión.” UIS, Bucaramanga, 2015.
- [11] E. Camacho and C. Bordons, *Model Predictive Control*, 2nd ed. London: Springer-Verlag, 2004.
- [12] Product information Sheet (2013) – Quanser Coupled Tanks. Quanser



Análisis del Efecto Venturi para la Admisión de Aire en el Quemador de una Criadora de Pollos

Analysis of the Venturi Effect for the Admission of Air in the Burner of a Chicken Hatchery

Brayan Darío Rosero Coral^{1, γ}, Luis Carlos Flórez García¹, Hernán Darío Patiño Duque¹

1. Risaralda, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia

γ. Autor correspondiente: bdrosero@utp.edu.co

Resumen

En el presente trabajo se analiza el comportamiento en la sección de la criadora de pollos donde es admitido el aire que se requiere para realizar la mezcla con el gas (propano) y posteriormente producir la combustión de la mezcla por medio de la dinámica de fluidos computacional. Esto se lleva a cabo mediante el efecto Venturi debido al cambio de sección que se presenta en esta parte de la geometría. Además, se muestra en el modelo computacional lo que ocurre en la zona de mezcla, donde se nota una turbulencia del flujo justo después de pasar por la reducción de la sección que es la que hace que el efecto Venturi se produzca, generando una presión de vacío en la zona de admisión del aire.

Palabras clave: dinámica de fluidos computacional, Venturi, criadora de pollos

Abstract

In the present work the behavior in the section of the chicken hatchery is analyzed, where the air that is required to make the mixture with the gas (propane) is admitted and subsequently the combustion of the mixture take place through the computational fluid dynamics. This is done by the Venturi effect due to the change of section that occurs in this part of the geometry. In addition, it shows in the computational model what happens in the mixing zone, where turbulence is noticed just after going through the reduction of the section that is what causes the Venturi effect is produced, generating a vacuum pressure in the air intake area.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Venturi, chicken hatchery

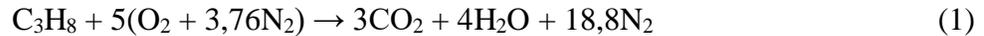
Introducción

En Colombia el sector avícola está ampliamente posicionado dentro de la estructura económica, y ha pasado de ser una actividad netamente artesanal a una actividad altamente tecnificada con el fin de garantizarle al consumidor un producto de calidad e inocuo y al productor un mayor índice de productividad. Para lograr esto se han optimizado diversos procesos y sistemas que facilitan la labor del avicultor y al mismo tiempo se logra un mayor rendimiento [1], [2].

En la actualidad debido al factor económico, así como al ambiental, es de gran importancia aprovechar al máximo la energía generada por un combustible, en este caso el propano. Como buena práctica de la ingeniería, es estudiar el comportamiento térmico e hidráulico en los procesos donde se utiliza combustible mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD), herramienta que se ha vuelto muy usada en la medida que las capacidades de computo se han incrementado [3], [4].



Para obtener una combustión completa y de esta manera obtener el mayor potencial del propano quemado, uno de los parámetros más importantes es la relación aire-combustible, considerando una oxidación ideal, se requiere una relación estequiométrica como la que se presenta a continuación



En las últimas décadas se han desarrollado métodos numéricos que ayudan en la solución aproximada de éstos problemas debido a que es difícil encontrar una solución analítica [5], [6].

En la dinámica de fluidos computacional se utiliza el método de volúmenes finitos, que permite discretizar y resolver numéricamente ecuaciones diferenciales dividiendo el dominio de cálculo en un número finito de volúmenes de control no solapados, de forma que cada nodo de la malla esté rodeado por uno de estos volúmenes de control. Para dar solución al sistema la ecuación diferencial se integra sobre cada volumen de control [7].

Criadora de pollos

Teniendo en cuenta que las aves llegan a las granjas avícolas con apenas unas horas de salidos del cascarrón se hace necesario tener un sistema de calefacción con el fin de brindarles calor para que les ayude a mantener su temperatura en un nivel óptimo y así evitar que mueran. Para este proceso se utiliza un equipo que se conoce como criadora (ver figura 2), que se encuentra ubicada a una altura de 1,2 m del suelo del galpón, la cual actúa de manera similar a la transferencia de calor emitida por el sol, emitiendo rayos infrarrojos hacia el piso los que se convierten en calor cuando alcanzan a las aves o a la cama.

En la tabla 1 se tiene información de diferentes tipos de criadoras, la criadora que se está analizando es del tipo infrarrojas, y se usa durante los primeros días que los pollitos ingresan al galpón, por lo tanto, debe generar el calor suficiente para mantener el suelo del galpón a una temperatura entre los 29 y 31 °C. Para lograr esto se hace mediante la combustión de la mezcla aire combustible. La admisión del aire necesario para la combustión se hace mediante el efecto Venturi, fenómeno que se estudió en este trabajo.

Tabla 1. Temperatura del suelo [8]

Temperaturas recomendadas para la cría de pollitos (Temperatura en °C)			
Día de nacido el pollo	Calentador de aire forzado	Campanas radiantes	Criadoras infrarrojas
0	34	32	31
3	31,5	30,5	29
7	30	29	28
14	28	27,5	26
21	24,6	25,7	23

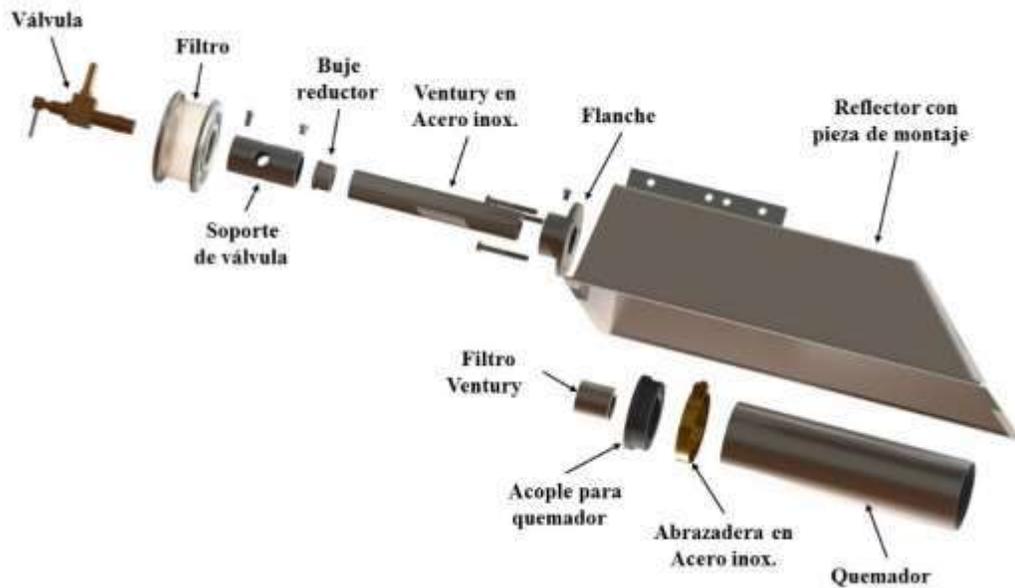


Figura 2. Criadora de pollos y sus componentes

Los datos de flujo másico y presión que se usaron para el desarrollo del trabajo son datos adquiridos en campo mediante la ayuda de un medidor de flujo y un regulador de presión al cual se le conecta a un manómetro, las unidades del medidor de flujo se encuentran en el sistema inglés (SCFH *Stándard Cubic Feet per Hour*), tal como se muestra en la figura 3, donde se aprecia que el caudal es de 4,6 SCFH (\dot{Q}_{medido}), la conversión a flujo másico se realiza tomando una densidad del gas de $2,01 \text{ kg/m}^3$.



Figura 3. Medición del caudal de gas



La medición de caudal se toma a una presión y temperatura que en general no corresponden a las consideradas estándar (101,325kPa y 25°C), y siendo los gases compresibles se hace necesario aplicar una corrección para expresar el mismo en condiciones estándar. En la medición de caudal de combustible, se emplea la ecuación 5 para calcular el flujo real del gas (propano) [9].

$$\dot{Q}_{real} = \dot{Q}_{medido} * \sqrt{\frac{R_{propano}}{R_{aire}}} * \sqrt{\frac{P_{Pereira}}{P_{Standard}}} * \sqrt{\frac{T_{Standard}}{T_{Pereira}}} \quad (2)$$

Tabla 2. Datos de las variables para hacer correcciones del flujo de gas

Variable	Valor	Unidad
P _{Pereira}	12,5	Psi
P _{Standard}	14,7	Psi
T _{Pereira}	296,15	°K
T _{Standard}	298,15	°K
R _u	8,314	kJ/kmol K
PM _{propano}	44,1	kg/kmol
PM _{aire}	28,9	kg/kmol
Densidad del propano	2,01	kg/m ³

Las variables P_{Pereira} y P_{Standard} representan la presión atmosférica de Pereira y la presión atmosférica a nivel del mar respectivamente. La variable T_{Pereira} se refiere a la temperatura de la ciudad de Pereira y T_{Standard} es la temperatura a nivel del mar.

Los valores de las constantes R_{propano} y R_{aire} que son las constantes del gas y el aire se calculan mediante las ecuaciones 3 y 4 respectivamente, donde para realizar este cálculo se utiliza la constante universal de los gases R_u, el peso molecular del propano PM_{propano} y el peso molecular del aire PM_{aire}.

$$R_{propano} = \frac{R_u}{PM_{propano}} \quad (3)$$

$$R_{aire} = \frac{R_u}{PM_{aire}} \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{real} = 3,44 \frac{ft^3}{h} \quad (5)$$

Después de realizar los respectivos cálculos se tuvo un caudal real de 3,44 SCFH, valor que se expresa en la ecuación 5. Para obtener el flujo másico de gas en el SI se procedió a realizar el cálculo expresado en la ecuación 6, de donde se obtiene como resultado el flujo másico del gas que se expresa mediante la ecuación 7.

$$3,44 \frac{ft^3}{h} * \frac{(0,3048m)^3}{ft^3} * \frac{1h}{3600s} * 2,01 \frac{kg}{m^3} = 5,4e^{-5} \frac{kg}{s} \quad (6)$$



$$\dot{m}_{gas} = 5,4e^{-5} \frac{kg}{s} \quad (7)$$

Creación del modelo de elementos finitos

La sección de la criadora para pollos que se va a estudiar tiene como finalidad favorecer el mezclado del combustible con el aire, ésta sección la componen los siguientes elementos: soporte de válvula, buje reductor, tubo metálico y válvula de gas, tal como se muestra en la figura 4.

La simulación se realizó en varias etapas, en la primera etapa se generó el modelo computacional en 3D de todos los componentes de la criadora y se realizó el respectivo ensamble, después de tener el ensamble completo se separó los componentes en los cuales se realiza el proceso de adición de gas y aire, en la figura 4 se muestran los componentes seccionados para mostrar su interior, que es por donde el fluido se desplaza y en sí lo que se va a analizar en la simulación.

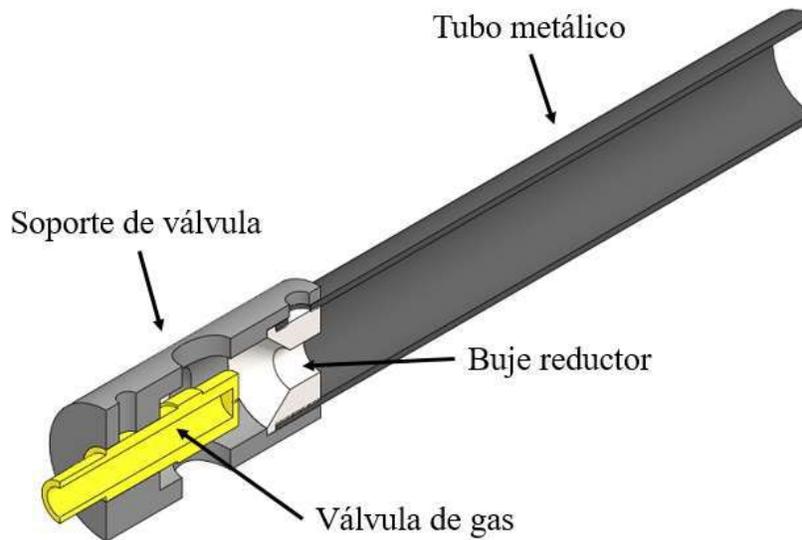


Figura 4. Modelo computacional

Después de tener la geometría tridimensional de la criadora de la criadora de pollos se realizó el modelo del interior que representa el fluido interno, donde ocurre la mezcla del aire con el propano ésta geometría se muestra en la figura 5

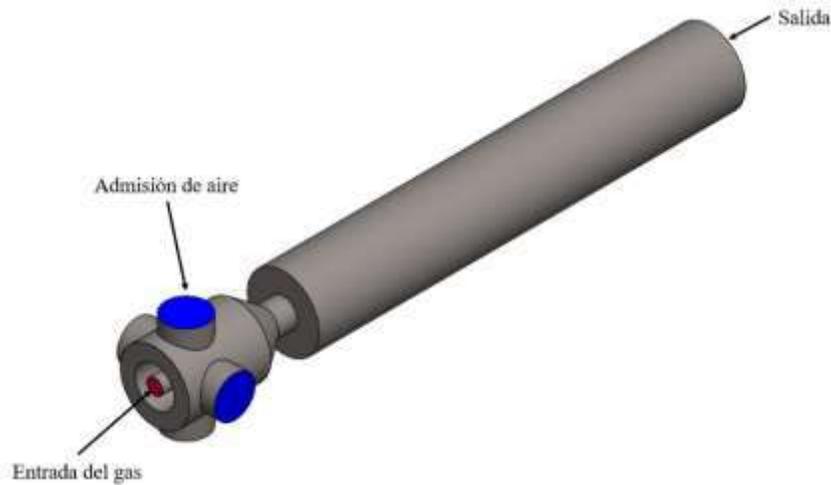


Figura 5. Volumen que representa fluido en el interior del Venturi

En la figura 5 la sección que se resalta con color rojo es por donde se ingresa el gas (propano) con una presión de 18 Psi que es la presión de operación del equipo, esto garantiza que el funcionamiento sea óptimo, generando una buena combustión y evitando la generación de hollín; al alimentar al equipo con ésta presión se produce un flujo másico de $5,4 \times 10^{-5}$ kg/s. Las secciones resaltadas con color azul indican las zonas por donde ingresa el aire para poder realizar el proceso de combustión, para el proceso de simulación la geometría que representa el fluido se dividió a la mitad para realizar una simulación por medio de un plano simétrico y reducir el tiempo computacional en la solución, tal como se muestra en la figura 6.

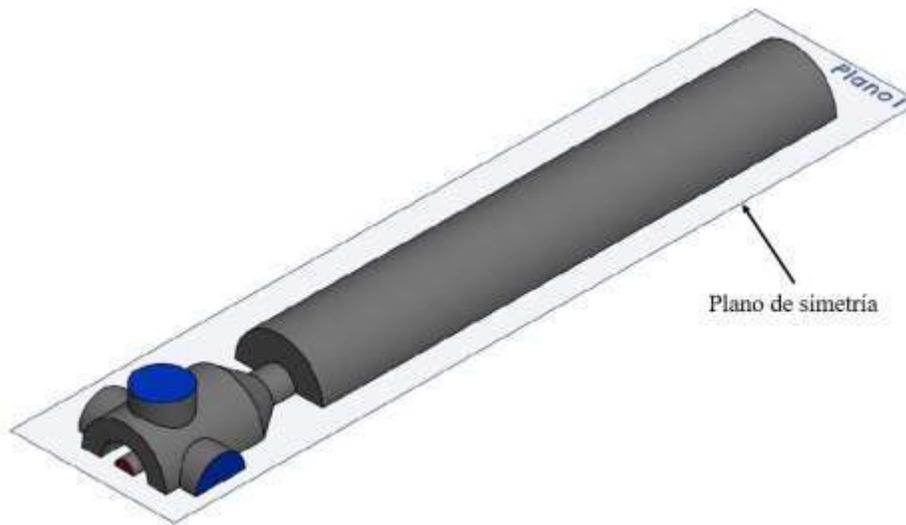


Figura 6. Geometría del fluido para trabajar en Ansys

Después de tener lista la geometría que representa el fluido, ésta se exportó al software ANSYS Fluent, donde se procedió a discretizarla generando una malla con volúmenes finitos, donde se optó por usar hexaedros, tal como se muestra en la figura 7, debido a que este tipo de malla reduce el número de elementos del dominio fluido y mejora la convergencia de la solución, por lo tanto,



demanda menor tiempo en el proceso de simulación [10].

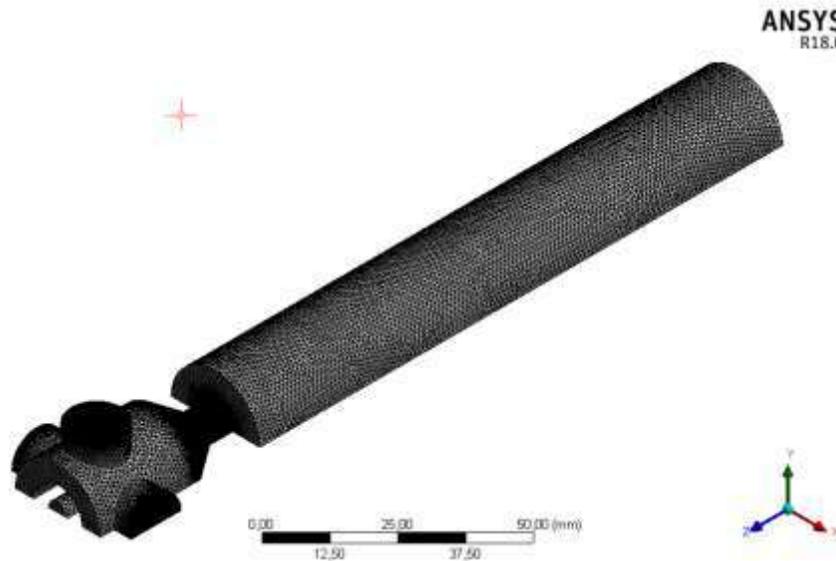


Figura 7. Mallado del modelo que representa el fluido interno

El tamaño de la malla varía en diferentes zonas de la geometría, ya que en las zonas de mayor interés como la de admisión de aire, donde el gas es descargado y donde hay la reducción de diámetro para generar el efecto Venturi y crear el vacío para que el aire ingrese, se hizo una malla más fina. Tal como se muestra en la figura 8.

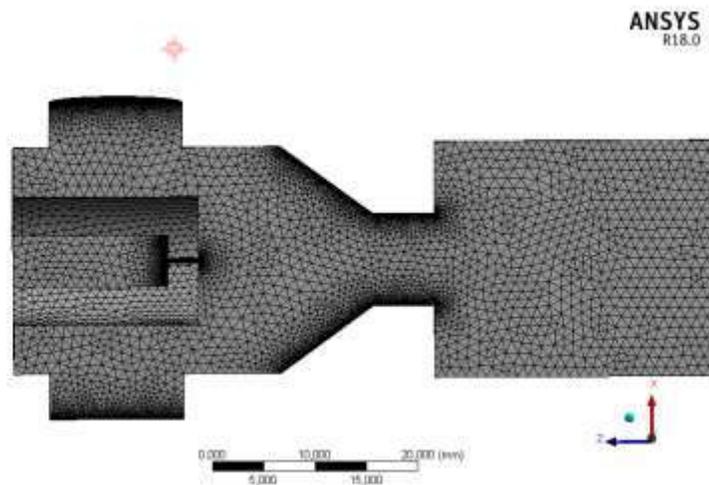


Figura 8. Zonas con refinado de malla

La geometría resultante cuenta con un número de nodos igual a 508525 y un número de elementos igual a 2655475.

Para este caso el modelo que se utilizó fue el de turbulencia $k - \epsilon$, puesto que para números de Reynolds elevados este resulta un método de resolución eficiente tal como lo describe Marias et al 2002 [11]. Este modelo está basado en las ecuaciones de transporte para la energía cinética



turbulenta (k) y la razón de disipación (ε), las cuales se definen de la siguiente manera:

$$\frac{\partial}{\partial X_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial X_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (9)$$

La viscosidad turbulenta μ_t es definida como:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

Donde las constantes $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ y C_μ se obtienen de condiciones experimentales, usualmente los valores de estas constantes son: $C_{1\varepsilon} = 1,44$, $C_{2\varepsilon} = 1,92$ y $C_\mu = 0,09$. Los términos G_k y G_b representan la generación de energía cinética turbulenta debido a gradientes medios de velocidad y efecto de empuje, respectivamente, Y_M representa la contribución de efectos de dilatación fluctuante en turbulencia con efectos de compresibilidad, para la velocidad total de disipación. Los términos S_k y S_ε son opciones de funciones definidas por el usuario en FLUENT [4]

Para el transporte de especies se utilizó el modelo *eddy-dissipation*, debido a que se supone que las reacciones de la combustión se atribuyen principalmente al fenómeno turbulento y no a la cinética química Baukal et al [12]. Este modelo resuelve las ecuaciones de conservación para las especies químicas [3]

La simulación se realizó en estado estable y se consideró la condición de no deslizamiento en las paredes de la geometría.

Para el análisis se consideró la velocidad de entrada al sistema la cual es de 0,114 m/s. en la tabla 3 se muestran las condiciones de frontera.

Tabla 3. Condiciones de frontera

Condiciones de frontera	Magnitud
Flujo másico de gas a la entrada (kg/s)	$5,4e^{-5}$
Temperatura a la entrada (K)	300
Presión a la entrada del gas (kPa)	124,105
Presión a la entrada del aire (kPa)	101,3
Presión a la salida (kPa)	101,3
Temperatura a la entrada del aire (K)	300



Resultados y discusión

Realizando un análisis de contornos de velocidad es posible determinar las zonas en las que los fluidos pueden quedarse estancados y zonas donde logran máxima velocidad. En la figura 9 se muestra el contorno de velocidades para las diferentes zonas de la geometría de estudio. Allí se puede observar las zonas donde el fluido alcanza las velocidades máximas que se encuentran entre 153 a 179,2 m/s, éstas se presentan en la zona donde hay una reducción en la sección de la geometría, donde ya el gas y el aire se empiezan a mezclar. Por otro lado, la alimentación del gas tiene una velocidad uniforme, mientras que zona de alimentación de aire genera unas velocidades bajas que se encuentran entre 25 y 51 m/s. Al realizar un acercamiento de la geometría, tal como se muestra en la figura 10, en la zona donde se descarga el gas se observa que también se presentan velocidades elevadas que están entre 76 y 128 m/s.

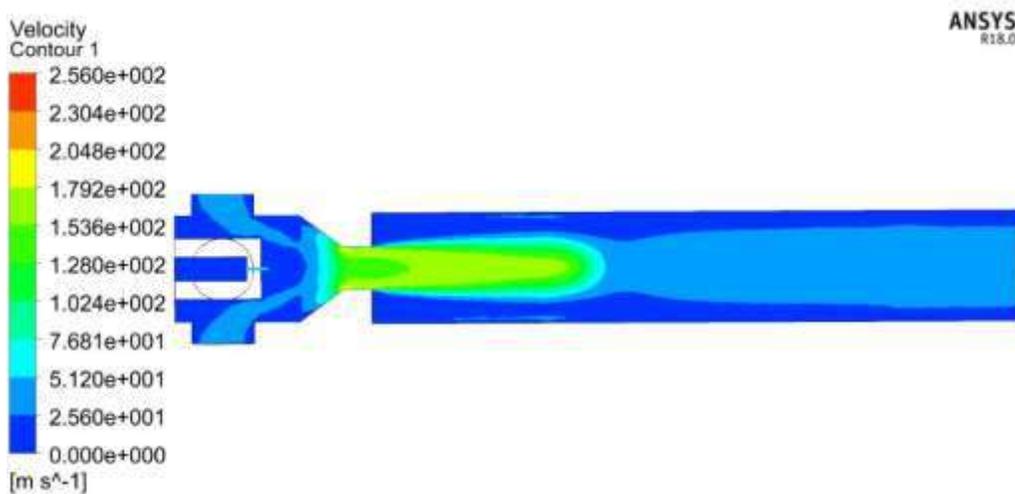


Figura 9. Contorno de velocidades

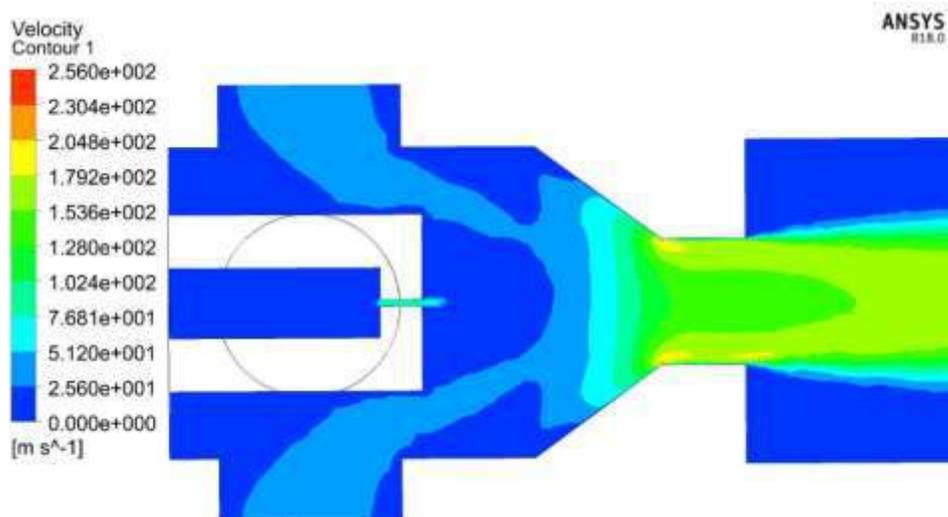


Figura 10. Zoom zona de descarga del gas



En la figura 11 se puede visualizar el comportamiento del fluido mediante vectores que indican la dirección del mismo, así como las zonas donde se genera algo de turbulencia.

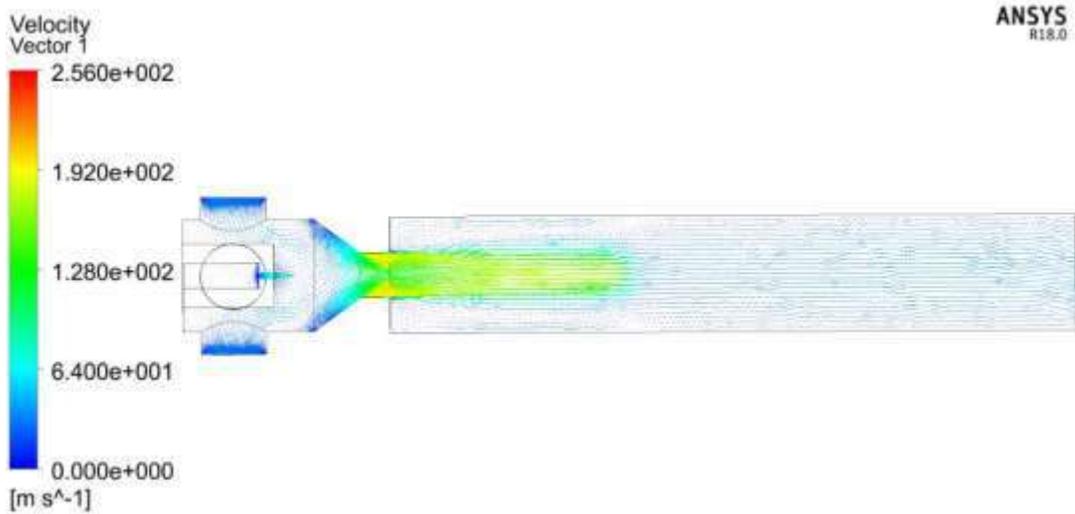


Figura 11. Vector de velocidad

Para observar de forma más detallada el comportamiento presentado vectorialmente se realiza un acercamiento, éste es mostrado en la figura 12.

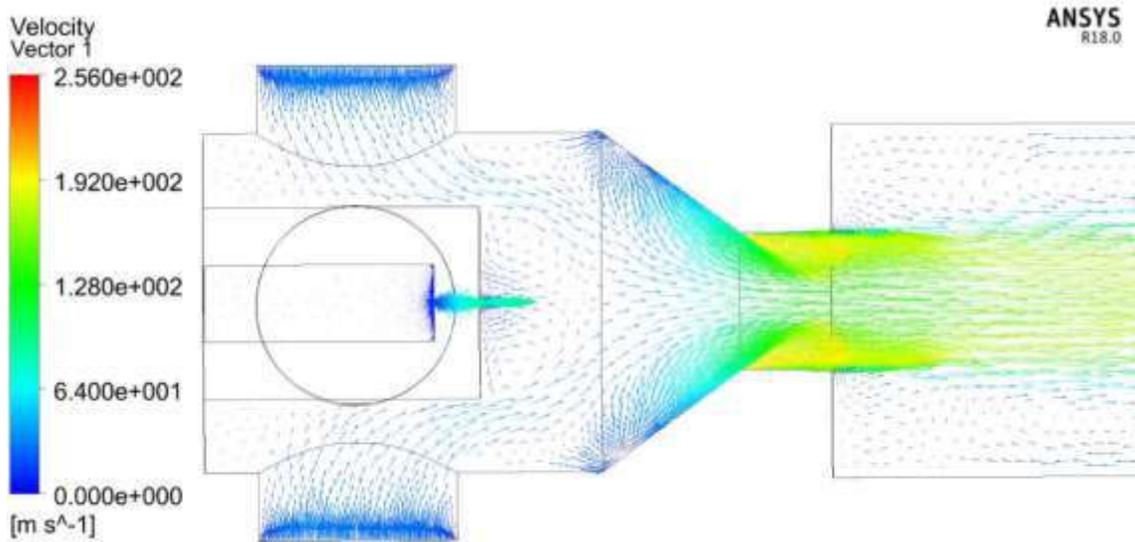


Figura 12. Zoom vector de velocidad

Si se analiza desde los contornos de presión en la zona donde ingresa el aire, se puede observar que se genera una presión negativa, por lo tanto, se está generando un vacío que es lo que hace que el aire que se necesita para realizar la combustión ingrese al sistema, esto se puede observar en la figura 12. Este efecto se muestra con más detalle al realizar un zoom en una de las zonas de admisión de aire (vista superior), tal como se muestra en la figura 13.

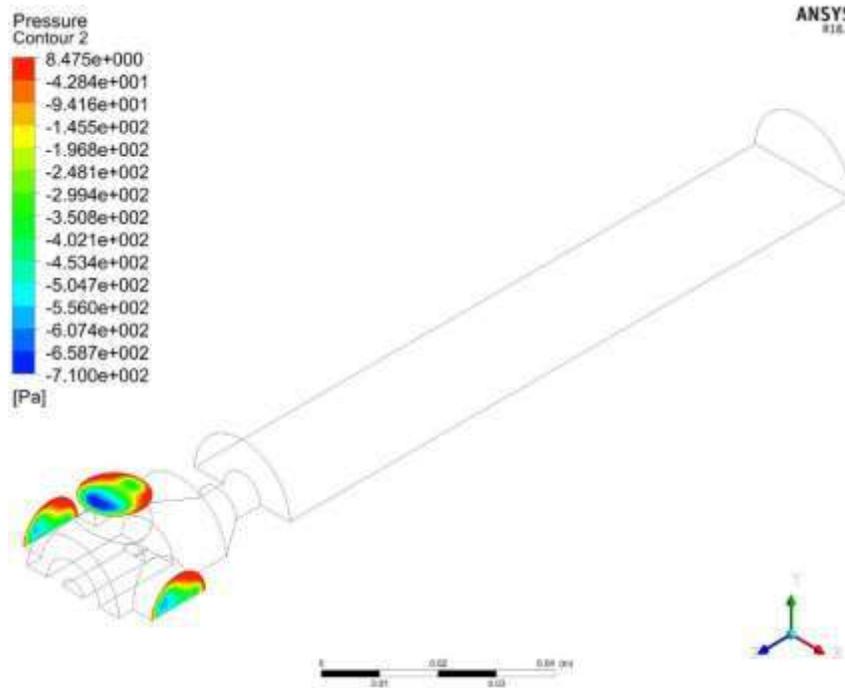


Figura 13. Contorno de presión zona de admisión de aire

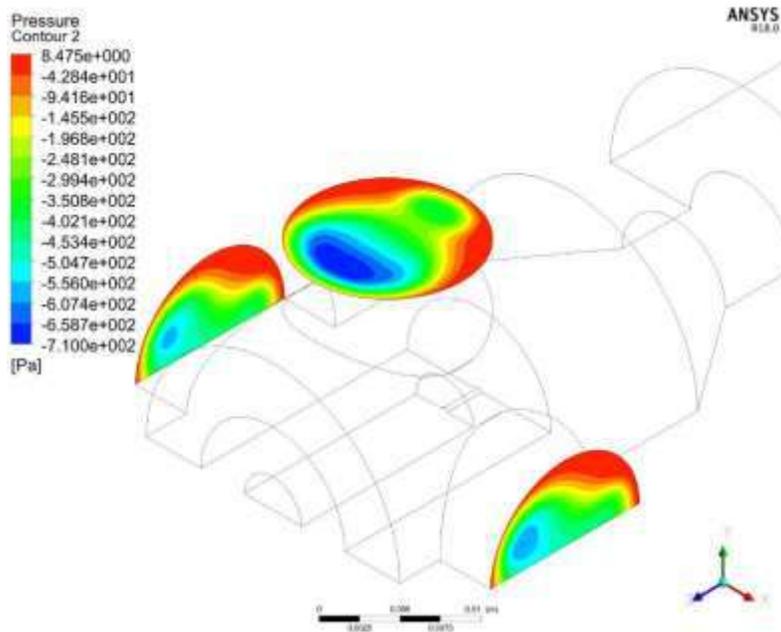


Figura 14. Zoom contorno de presión

Se puede observar que la presión de vacío que se genera para lograr que el aire ingrese al sistema es de 710 Pa.

En las siguientes figuras 14, 15 y 16 se muestra mediante streamline como es el comportamiento del fluido al largo de toda la geometría, desde la inyección del gas y la admisión del aire hasta que



se descargan al final de la geometría.

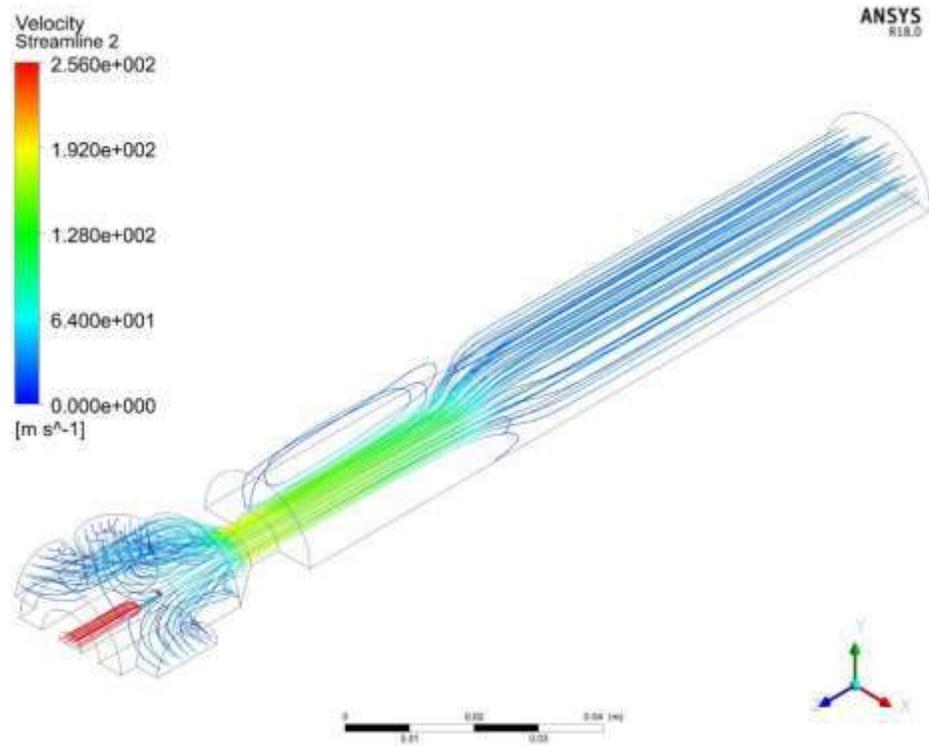


Figura 15. Streamline de los fluidos

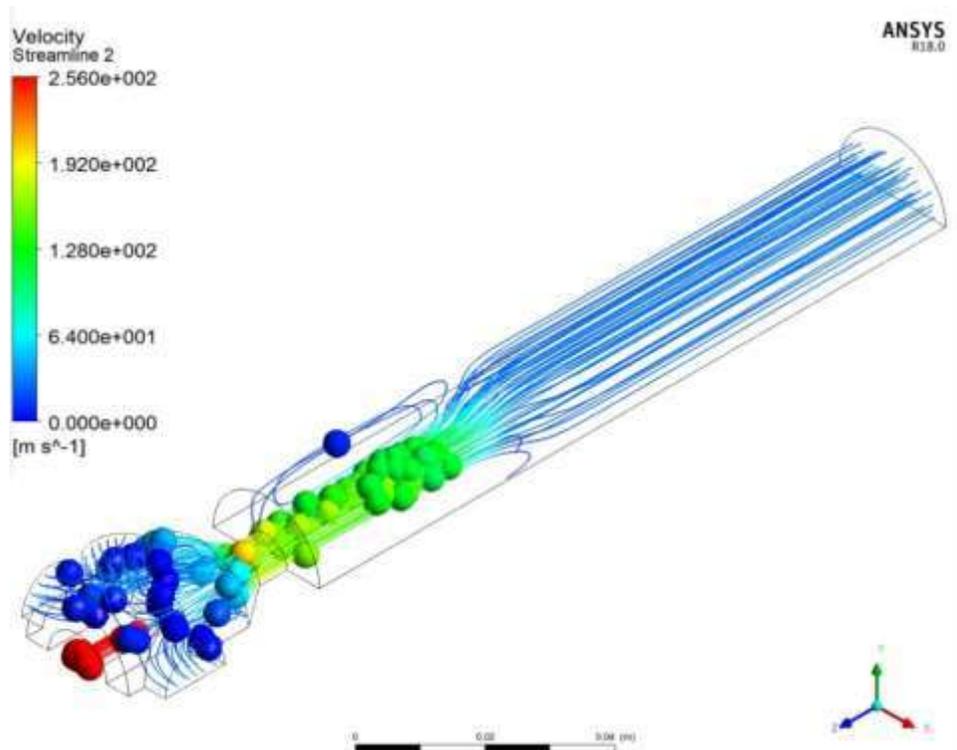


Figura 16. Inicio de inyección de gas y admisión de aire

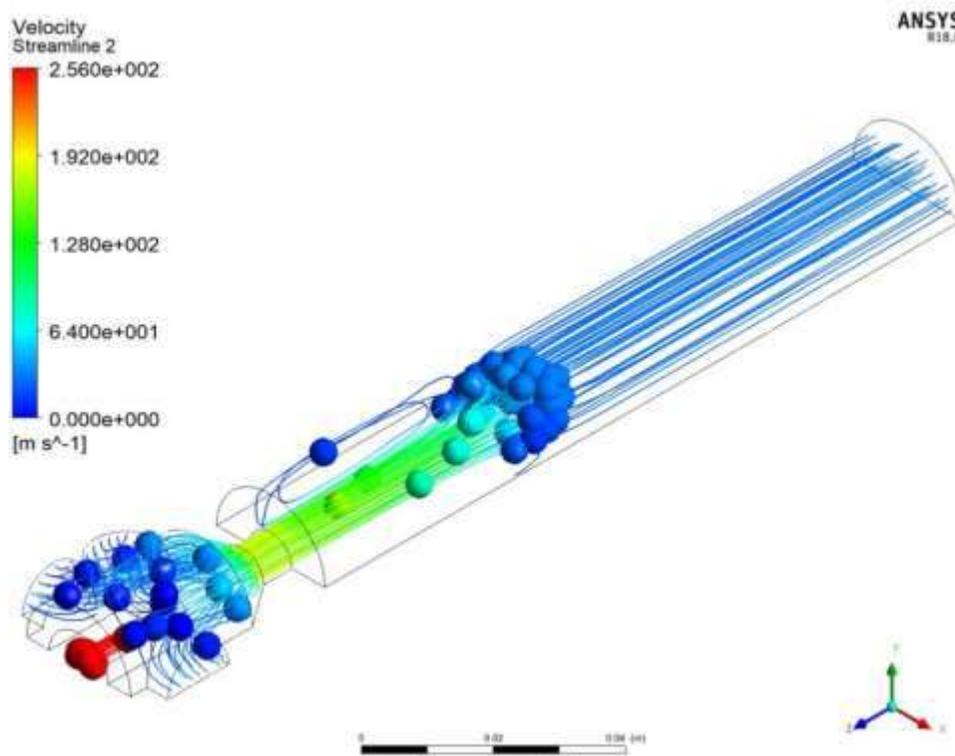


Figura 17. Fluido en zona de mezcla

Considerando que el dominio computacional es pequeño, el tiempo computacional es grande, para este trabajo se utilizó un computador Intel(R) Core(TM) i7-4700MQ CPU de 2,4GHz de velocidad de procesamiento y 16 GB de memoria RAM. Para este trabajo, el tiempo de simulación fue de 36 horas continuo.

Conclusiones

En este trabajo se realizó el estudio a una sección de una criadora de pollos, la sección estudiada fue en donde se hace la inyección de gas, admisión de aire y pre-mezcla. La simulación fue realizada mediante la herramienta CFD, este trabajo involucró el dibujo y la discretización tridimensional de la geometría, así como la solución de las ecuaciones de cantidad de movimiento, energía y conservación de la masa.

Los resultados muestran que en la zona donde se descarga el gas se genera una presión negativa, la cual genera un vacío que succiona el aire y lo ingresa al sistema para realizar la mezcla. El vacío se genera debido al efecto Venturi que se presenta en la zona por la reducción de área que hay en la geometría.

Los resultados obtenidos al finalizar este trabajo son interesantes porque ayudan a entender mejor lo que ocurre en el mecanismo de succión de aire por medio de efecto Venturi, así como también ayuda a realizar mejoras para optimizar funcionamiento del equipo, tiempo y materiales para su construcción.

Recomendaciones para futuros trabajos

Sería ideal hacer un trabajo donde se involucre la combustión y ver el comportamiento de la llama



para compararla con la llama generada por el equipo físico, así como también un análisis de la radiación de calor que la criadora genera para calentar las aves.

Referencias

- [1] F. Avila cortes, “Perspectivas Avícolas 2017,” *Fenavi*, pp. 6–24, 2017.
- [2] “Cómo va la industria avícola en Colombia.” [Online]. Available: <https://www.dinero.com/edicion-impresa/negocios/articulo/como-va-la-industria-avicola-en-colombia/242959>. [Accessed: 29-May-2018].
- [3] S. Martínez-Martínez *et al.*, “Análisis de la combustión en un quemador industrial con alta relación de aire-combustible,” in *Memorias de XVI congreso Internacional anual de la SOMIM*, 2011, pp. 1076–1083.
- [4] L. R. Cancino, Á. H. Restrepo, and A. A. M. Oliveira, “Análisis numérico de la combustión en un quemador atmosferico tipo corona de aplicación domestica,” *Sci. Tech.*, no. 35, pp. 201–206, 2007.
- [5] X. Y. Cui, Z. C. Li, H. Feng, and S. Z. Feng, “Steady and transient heat transfer analysis using a stable node-based smoothed finite element method,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 110, pp. 12–25, 2016.
- [6] A. Singh, I. V. Singh, and R. Prakash, “Meshless element free Galerkin method for unsteady nonlinear heat transfer problems,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 50, no. 5–6, pp. 1212–1219, 2007.
- [7] C. M. Rodríguez, “Capítulo 4 Modelo numérico,” in *Simulación numérica de flujos convectivos a altos números de Rayleigh en sistemas pasivos de climatización*, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial - Universidad Politécnica de Cartagena, Ed. 2006, pp. 37–63.
- [8] “La temperatura, esencial para el rendimiento en granjas avícolas - Agrinews.” [Online]. Available: <https://agrinews.es/2014/01/14/temperatura-esencial-rendimiento-avicola/>. [Accessed: 24-Jul-2018].
- [9] A. Yopez and A. Tangarife, “Medición experimental de la velocidad de llama de mezclas aire-propano mediante el método del ángulo de cono.” UTP, Pereira, 2014.
- [10] José Carrillo Sánchez and Castillo Elsitdié Luis, “Consideraciones del mallado aplicadas al calculo de flujos bifasicos con las tecnicas de dinamica de fluidos computacional.pdf,” *IV Jornadas Introd. a la Investig. la UPCT*.
- [11] F. Marias, J. R. Puiggali, M. Quintard, and F. Pit, “Quality of CFD models for jet flow analysis for the design of burners and boilers,” *Korean J. Chem. Eng.*, vol. 19, no. 1, pp. 28–40, 2002.
- [12] J. Charles E Baukal, *Industrial Burners*, vol. 20035863. CRC Press, 2003.



El Diseño de Máquinas en Tecnología Mecánica Machines Design in Mechanical Technology

Carlos Alberto Romero Piedrahita^{1,γ}, Edgar Alonso Salazar Marín^{1,γ}

1. Programa de Tecnología Mecánica, Facultad de Tecnología, Universidad Tecnológica de
Pereira, Pereira, Colombia.

γ. Autor corresponsal: cromero@utp.edu.co, edgarsalazar@utp.edu.co

Resumen

La fase de diseño constituye el aspecto más crítico de un proyecto, ya que el producto final debe, de manera económica, ajustarse a rigurosas especificaciones. Los ingenieros hoy disponen de herramientas computacionales para el diseño y la elaboración de prototipos reales y virtuales, lo mismo que para la simulación de los procesos de manufactura, el ensamble y las pruebas. No obstante, el ingeniero y los equipos de ingeniería deben considerar metodologías y estrategias que les permitan diseñar nuevos productos con capacidad de actualización. En este trabajo se presentan algunos elementos de metodología de diseño clásico y también una descripción breve de la teoría TRIZ como herramienta para potenciar la creatividad de los equipos de diseño.

Palabras claves: Diseño clásico, herramientas computacionales para el diseño, metodología TRIZ.

Abstract

The design phase is the most critical aspect of a project, since the final product must, in an economical way, comply with rigorous specifications. Engineers today have computational tools for the design and development of real and virtual prototypes, as well as for the simulation of manufacturing processes, assembly and testing. However, the engineer and the engineering teams must consider methodologies and strategies that allow them to design new products with updating capacity. This paper presents some elements of classical design methodology and also a brief description of the TRIZ theory as a tool to enhance the creativity of design teams.

Keywords: Classic design, computational tools for design, TRIZ methodology.

Introducción

Si antes el diseño se circunscribía a las actividades relacionadas con el producto, hoy en día el diseño incluye también la generación de necesidades para el usuario final, las formas de diálogo con éste, el ambiente y los medios mediante los cuales se crea, fundamenta, especifica, calcula, y proyecta el producto final en todo su recorrido de vida, desde la idea hasta su desecho y reciclaje. Existen grupos de diseño en todo el mundo con diferentes énfasis investigativos: procesos de generación creativa de ideas y desarrollo de estructuras conceptuales (Departamento de innovación y gestión del producto, de la Universidad Técnica de Delft); diseño inteligente y colaborativo CAD (Escuela de Arquitectura de la Universidad de Sidney); modelado de la etapa de síntesis dentro del proceso de diseño con exploración de ambientes de interrelación en la red de diseñadores (Instituto Nacional de Informática del Japón); educación en diseño con énfasis en la potenciación de la creatividad, la educación en ingeniería, la ingeniería distribuida, la



biomimética y la disección mecánica (Universidad de Stanford); enseñanza sistémica del diseño centrado en el usuario (Instituto de Tecnología de Illinois); estructuración de espacios visuales para intercambio de conocimiento y trabajo colaborativo en red (Instituto Tecnológico de Massachussets); optimización del diseño multidisciplinario y prototipado rápido y virtual (Universidad de Clemson). El diseño integra los factores humanos, cognitivo, computacional, gestión del conocimiento, trabajo en equipo y con estos ingredientes conviene que se analice en los contextos pedagógicos en los programas de Tecnología Mecánica.

En el ámbito de los programas de Ingeniería y Tecnología Mecánica, el Diseño mecánico se mira asociado a la ingeniería concurrente y a la gestión del ciclo de vida del producto, desarrollados bajo el tratamiento sistemático y confluyente o integrador de las tareas o actividades, desde las fases de concepción del producto hasta su presentación comercial, incluyendo los procesos de manufactura y control, la estructura organizativa de la planta de fabricación, la comercialización, la instalación, el uso y las etapas posteriores a su utilización como el servicio, la reparación y el reciclaje. Etapas del diseño tradicional o secuencial, consideradas aisladas como el análisis del problema, el estudio de las alternativas de solución, el diseño conceptual, la elaboración de planos constructivos, tecnológicos y prototipos, se amplían ahora, para incluir fases y etapas que antes o no se consideraban (como la opinión del consumidor), o eran consideradas de responsabilidad de “otros”, no de los diseñadores.

La evolución de las herramientas de modelado y simulación y la disponibilidad de herramientas de programación, modelado, simulación y control, así como el cruce de tecnologías de enlace, las nuevas relaciones de producción y geopolíticas y la demanda de reducidos tiempos para el desarrollo de los productos crean las condiciones para el trabajo en equipo, multilateral y multivariable, haciendo posible que los productos *sean fabricados, probados y atendidos en el menor tiempo*, al menor costo y con el mínimo de insumos y desechos.

Los parámetros iniciales para la fabricación de un producto pueden estar dados mediante: una tarea técnica en la cual se especifican los parámetros del producto, el campo de empleo y las condiciones de operación; una propuesta técnica planteada por una oficina de proyectos; un programa de investigación científica; una solicitud de invención; un modelo de máquina que se debe copiar o rediseñar o un rediseño de un producto que ya se ha venido fabricando. Así se conserva en el contexto local el abordaje de los proyectos de diseño y que se inician a partir del encargo de una tarea técnica, como se representa en la figura 1.

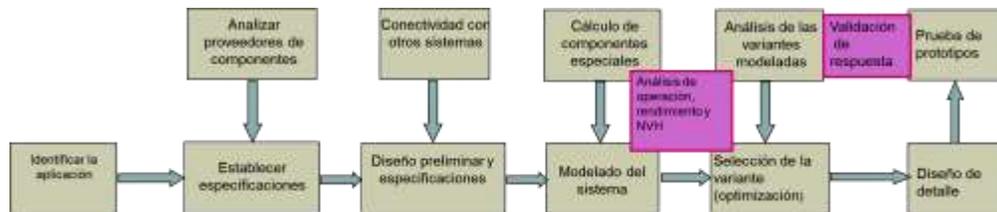


Figura 1: esquema local de las etapas del diseño en los procesos industriales



En la manufactura grande, por ejemplo, la de los tres grandes productores de vehículos norteamericanos, se ha establecido un nuevo paradigma de producción orientado a distribuir y delegar gran parte de las actividades productivas en proveedores de confianza. Los fabricantes de equipos originales (en inglés “OEM”) han venido delegando las funciones también de diseño sobre sus proveedores. Es así como, por ejemplo, la Ford ha delegado en DANA (Dana Holding Corporation) el diseño y la fabricación total del bastidor y conjunto de rodamiento de algunos de sus modelos, cediéndole la responsabilidad de diseño también. Para el fabricante original esta estrategia le permite reducir su número de proveedores principales a sólo cerca de 70. A nivel mundial de manera paralela los proveedores de auto partes se van especializando y transformando en proveedores de módulos y sistemas completos.

El costo de los trabajos de diseño constituye una parte insignificante del precio de la producción de las máquinas (a excepción de las máquinas de producción individual y en pequeñas series). Sin embargo, su influencia en el costo de un rediseño puede ser mayor que la influencia ejercida por el proceso de manufactura (figura 2). Un diseño no suficientemente pensado puede generar costos de manufactura, organización, control y pruebas que podrían evitarse o ser menores en caso de haber llegado a una solución afinada o cercana a la ideal. Juega un papel muy importante en la realización de un diseño afinado la incorporación de todos los actores de la empresa (gerentes, jefes de producción, inspectores) a equipos de trabajo para el diseño en equipo.

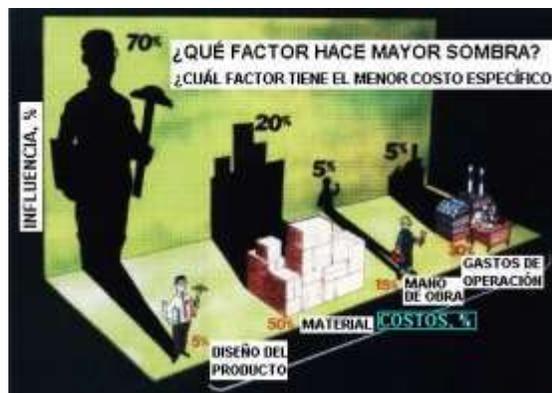


Figura 2: influencia estimada de los errores cometidos en los diferentes factores de costo asociados al desarrollo de un producto, sobre el costo generado por un rediseño.

Es particularmente crítico el estudio de los materiales iniciales al diseñar un producto nuevo; los errores en los parámetros y en la concepción fundamental de la máquina no admiten corrección y frecuentemente provocan un diseño fallido. En esta etapa no debe escatimarse ni el tiempo ni los recursos y más que nunca es válido el dicho del sastre: “medí siete veces por cada corte que vayás a hacer”

El orden (clasificación, limpieza, estandarización y mantenimiento) y el control visual en las empresas ayudan a que los jefes de producción y gerentes puedan seguir el flujo del trabajo e identificar las áreas susceptibles de mejoramiento. Las tareas de mejoramiento del proceso productivo pueden implicar intervenciones en el diseño de los productos. Durante el diseño de los productos se suelen considerar aspectos relacionados no solo con la pieza (geometría, distribución del espesor; exactitud dimensional, tolerancias, acabado superficial, microestructura, propiedades mecánicas y metalúrgicas, dureza), sino también con el tipo de producción (escala, productividad, flexibilidad), la pieza bruta (flujo de esfuerzos como función de la deformación, rapidez de deformación y microestructura, trabajabilidad como función de la deformación,



condiciones superficiales), las herramientas de fabricación (geometría, dureza de materiales, condiciones superficiales, rigidez y exactitud), las características de los equipos (capacidad de la máquina, velocidad/productividad, rigidez y exactitud), las zonas de deformación (mecánica de deformación, modelos usados para el análisis, flujo de material, velocidades, variación de los esfuerzos durante la deformación).

A lo largo de este artículo se comentan algunos elementos metodológicos que siempre han debido tenerse en cuenta en el diseño de maquinaria y que constituyen unos requisitos conceptuales estratégicos para el desarrollo de productos. También se comenta la teoría “TRIZ” (acrónimo ruso de la teoría para la solución de problemas de inventiva), como una tecnología importante para potenciar la creatividad. La aplicación de los principios metodológicos de diseño y la consideración de la teoría TRIZ constituyen una buena base conceptual para la exploración en equipo de soluciones de mejoramiento y prospectivas a problemas de diseño.

Metodología del diseño

Tratándose del diseño de la ingeniería y tecnología mecánica aplicada a la maquinaria de producción industrial, puede decirse que cada máquina moderna que se construye, constituye la síntesis del trabajo de los diseñadores de varias generaciones. Los diseños tecnológicos se suceden en espiral, avanzando recogiendo la experiencia adquirida no solo en la mecánica sino en todas las esferas de la creatividad humana, a manera de la rosca de un tornillo, con posibilidades de utilizar diferentes principios tecnológicos en la resolución de problemas, principios que se relevan históricamente, a medida que cada ramo de la tecnología evoluciona. A continuación, en este párrafo se comentan algunos principios generalmente considerados durante el proceso de concepción del diseño.

Adecuabilidad constructiva

En la búsqueda de un diseño de producto adecuado y actual es recomendable observar todos los desarrollos posibles en los diferentes campos científicos, principalmente en la Física, la Química y la ciencia de los Materiales (en particular para el diseño de máquinas). Son ingredientes básicos para garantizar la supervivencia en el tiempo de una familia de productos: la disponibilidad de material de información y de referencia, disponible en bases de datos, en la red, en vídeos, información del ramo de la producción que se trabaje, información relativa a otras ramas de la industria, incluso aquellas que parecen no tener nada que ver con su perfil, así como información relativa a otros proveedores, competidores y patentes. Al crear una nueva máquina el constructor debe mirar hacia adelante, hacia atrás y mirar a los costados. Soluciones encontradas para la suavidad de marcha en los vehículos pueden aplicarse en la maquinaria agroindustrial, por ejemplo; soluciones de control y telemetría en aviación pueden implementarse en los automóviles. Los desarrollos de la física óptica dan lugar a nuevas familias de sensores y actuadores ópticos que llegan a compartir y, en algunos casos, a relevar los sensores y actuadores tradicionales de otros tipos.

Fiabilidad de las máquinas

La fiabilidad de las máquinas se determina en primer lugar por la resistencia mecánica y la rigidez del diseño. Son maneras racionales de aumentar la resistencia específica de las piezas (resistencia por unidad de masa), de los módulos de ensamble y de las máquinas: el empleo de perfiles y formas ventajosas, el empleo de materiales resistentes avanzados, la utilización máxima de la resistencia del material, en lo posible distribución uniforme de la carga entre todos los elementos del sistema.



El empleo de perfiles está asociado a los métodos existentes de manufactura como la extrusión, el estampado y la forja. Métodos que han madurado hoy como los procesos de obtención de piezas por manufactura de polvos, pegado de piezas e hidroformado permiten aumentos significativos en la resistencia específica de los diseños modernos. Muchos bastidores para vehículos son hechos por hidroformado, muchas piezas del tren de potencia se obtienen por manufactura de polvos sinterizados.

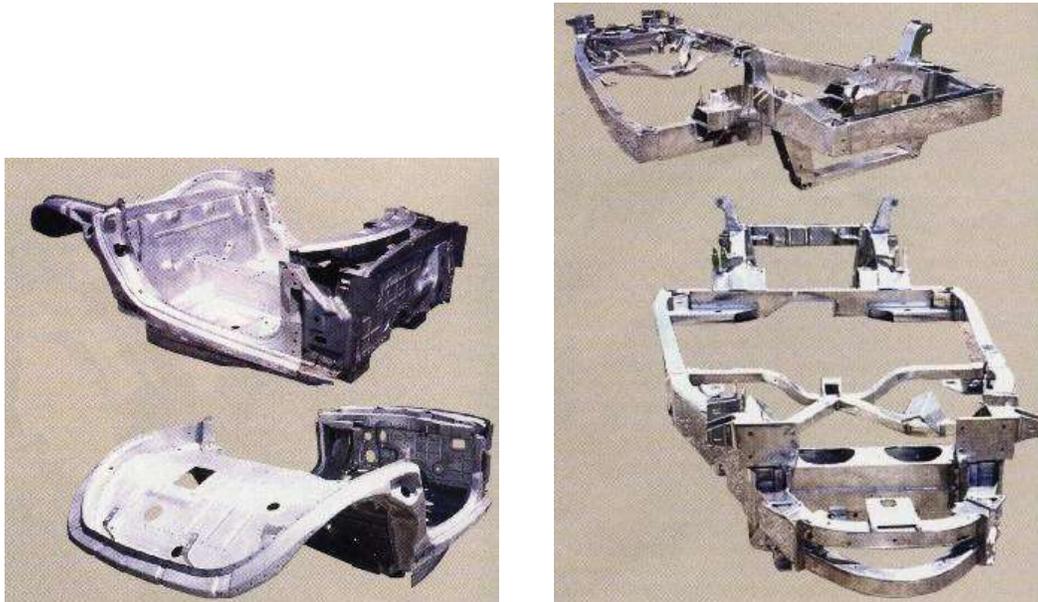


Figura 4: plataforma y bastidor del automóvil Plymouth Prowler.

Más de 400 kg de los 1260 kg del convertible son de aluminio, incluyendo la carrocería, el bastidor y las partes de la suspensión. El convertible es un banco de pruebas de tecnología de nuevos materiales, desde las extrusiones soldadas de aluminio e inyecciones aplicadas en el bastidor, hasta los discos de frenos, compuestos de matiz cerámica



*Figura 3: estructura monocasco de automóvil, basada en rieles hidroformados
Se extienden desde la punta hacia el torpedo, doblándose hacia afuera y hacia abajo por debajo de la carrocería, para volver a ascender y ampliarse en sección en la parte trasera*

En las figuras 3 y 4, a manera de ejemplo, se muestran la estructura de un auto deportivo basado en bastidor hidroformado y la plataforma del vehículo de pruebas Plymouth Prowler, muchos de cuyos componentes se han obtenido con perfiles, obtenidos por métodos muy perspectivas en términos tecnológicos, de aluminio. Los métodos racionales para elevar la rigidez se componen

en lo fundamental de la selección correcta del esquema de carga, la correcta distribución de los apoyos y la introducción a las piezas de formas rígidas.

Para ilustrar el mejoramiento en términos de rigidez y de reducción de masa, mediante el cambio del esquema de carga, en la figura 5 se ilustran algunos posibles esquemas de aseguramiento de los cilindros separados de los motores grandes, para aguantar las fuerzas generadas por la presión de los gases. En el primer esquema los cilindros se aseguran con espárragos portadores, 1; en el segundo esquema los cilindros se aseguran mediante los tornillos 2; en el tercer esquema el aseguramiento se realiza sólo mediante la tuerca 3. El tercer esquema es el más racional toda vez que además de tener menor número de elementos, aprovecha la rigidez de los cilindros para la transmisión de las fuerzas de los gases, la ruta de transmisión de las fuerzas es más corta. En el segundo esquema deben trabajar las camisas, lo que obliga a que éstas deban ser más gruesas.

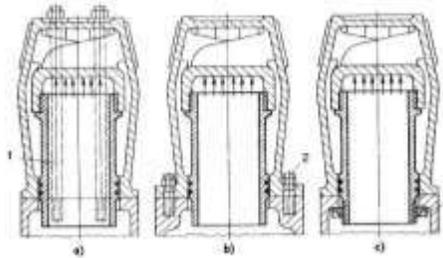


Figura 5: mejoramiento del esquema de fuerzas en el aseguramiento de las camisas en los motores de combustión con cilindros separados [2]

Otro ejemplo, presentado en la figura 6, es el relacionado con las alternativas de montaje y apoyo de los árboles. Evitando los montajes en voladizo y recurriendo al empleo de los rodamientos adecuados, puede lograrse reducciones sustanciales en los esfuerzos y las deformaciones experimentadas por los árboles.

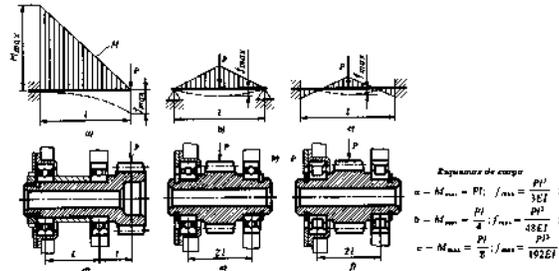


Figura 6: mejoramiento constructivo del montaje de una rueda dentada para reducción de las deformaciones [7]

Estudio de la esfera de aplicación

El diseño de las máquinas, destinadas para cierto sector de la economía debe estar precedido por un estudio a fondo de dicho sector, la dinámica de su desarrollo cuantitativo y cualitativo, por un estudio de las necesidades de la categoría dada de las máquinas y de la posibilidad de aparición de nuevos procesos tecnológicos y métodos de producción. El constructor debe conocer bien este sector y las condiciones de explotación de las máquinas. Al elegir los parámetros de las máquinas se deben tener en cuenta las condiciones concretas de su aplicación. No es posible, por ejemplo, aumentar arbitrariamente la productividad de la máquina, sin tener en cuenta la productividad de la maquinaria que la complementa. En algunos casos las máquinas de elevada productividad



pueden resultar descargadas y pueden permanecer más tiempo paradas que operando, lo que reduce el grado de utilización y el efecto económico.

A manera de ejemplo, la automatización de la tecnología de mecanizado, en su forma más simple, se inicia por la aplicación de una máquina procesadora sencilla, acompañada de manipuladores automáticos para montar las piezas brutas en la máquina desde un sistema de almacenamiento alimentador, pasando los componentes metálicos procesados de la máquina al sistema de almacenamiento de salida. Una concepción más elevada de una máquina procesadora de metal en la producción automatizada de hoy se concentra en las denominadas máquinas multipropósito o centros de mecanizado, en las que se dispone de varias tecnologías de maquinado en la fijación de la pieza a una máquina (durante una operación).

Elección del esquema constructivo

Al elegir los parámetros de las máquinas, el esquema principal y el tipo de diseño, debe centrarse la atención en los factores que determinan la efectividad económica de la máquina: elevada entrega de la máquina, consumo bajo de energía y de servicios, bajos gastos de explotación y largo período de utilización. El esquema de la máquina se elige generalmente tras el análisis paralelo de varias variantes, las cuales se someten a una valoración comparativa profunda desde el punto de vista de la racionalidad constructiva, la perfección de los esquemas cinemáticos y dinámicos, el costo de fabricación, la capacidad de almacenamiento de energía y la demanda de energía de fabricación, el gasto de mano de obra, la fiabilidad de acción, las dimensiones marco, del volumen de metal y de la masa, de la tecnologicidad o manufacturabilidad económica, del grado de agregación, de la comodidad de servicio, de montaje/desmontaje, del monitoreo, del reglaje y de la regulación.

A veces las condiciones contradictorias impuestas al diseño hacen imposible una solución en todo ventajosa. En estos casos debe decidirse por una variante de conveniencia o compromiso, obviando las condiciones de menor ponderación en la aplicación dada. A veces la variante que se elige no es la que tiene más cualidades, sino la que tiene el menor número de defectos. En la figura 7 se ilustran diferentes esquemas constructivos de mecanismos de distribución de gases. Es deseable que la masa inercial reducida a las válvulas sea baja, sin embargo la utilización de árboles en la culata en los motores comerciales vino a ser posible con el perfeccionamiento tecnológico de las transmisiones por correa y otros desarrollos concurrentes requeridos.

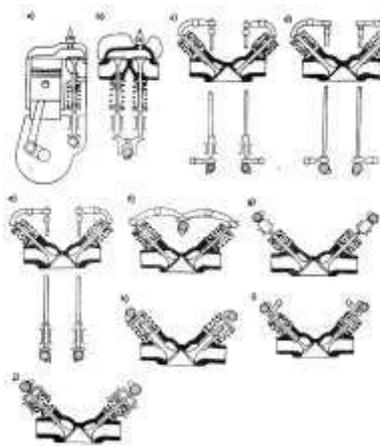


Figura 7: esquemas constructivos de mecanismos de distribución de gases [5]



Un desarrollo constructivo posterior (teorizado y llevado a la práctica en modelos experimentales hace mucho tiempo) está representado por los mecanismos de distribución de gases de fases controladas (figura 8).

El mecanismo está compuesto de dos subsistemas: uno es el conjunto mecánico que convierte la rotación del cigüeñal en la oscilación de una leva a través de un mecanismo de transmisión que incluye un balancín, las válvulas se accionan por la oscilación de la leva de salida; el otro subsistema es una transmisión accionada por un motor DC que varía los eventos valvulares y los ascensos de acuerdo a las condiciones de operación, controlando las posiciones angulares de un árbol de control.

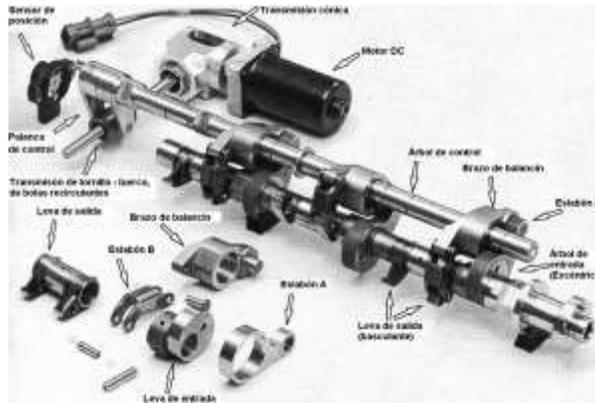


Figura 8: sistema de control variable de las fases y el ascenso de las válvulas, VEL (“Variable valve event and lift control device”) de la Nissan. El sistema posibilita un control continuo tanto de la fase como del ascenso de las válvulas, desde un estado de desactivación, hasta una apertura máxima prolongada [4]

El árbol de control tiene una leva excéntrica insertada en el cilindro pivote del balancín, para cambiar el estado del mecanismo de transmisión y la leva de salida. La función del balancín consiste en transmitir el movimiento del eslabón A generado por la excéntrica de entrada a la leva de salida, mediante el eslabón B. Gracias a que la posición angular del balancín sobre el árbol de control puede cambiarse mediante la acción del motor DC y las transmisiones cónica y de tornillo – tuerca, se logran variaciones de la fase del desplazamiento del eslabón B y variaciones de la fase de la leva de salida; el perfil de ésta determina la magnitud del desplazamiento de la válvula. La fase de control real es monitoreada por un sensor de posición; para lograr la fase deseada se ha diseñado un sistema de control PID.

El sistema VEL involucra muchos componentes y esto le resta fiabilidad frente al sistema de tren valvular electromecánico. El tren valvular electromecánico (figura 9) se compone de dos electroimanes, un resorte y un núcleo que se une a la válvula; las válvulas se abren y cierran según la interacción de la fuerza del resorte y el campo magnético. Controlando las corrientes de las bobinas magnéticas, la unidad electrónica controla el tiempo de apertura de las válvulas y su velocidad de desplazamiento.

El actuador se equipa con un detector de desplazamiento tipo inductivo (un desarrollo basado en el principio de los LVDT - transformador lineal diferencial de voltaje) que además da la información de la velocidad. La unidad de control de la válvula genera las salidas en función de los detectores de posición y velocidad del cigüeñal y del núcleo de cada válvula y de la corriente



medida en la bobina. Procesando esta información para cada válvula, se genera la información de control para los relevadores del circuito de ambos solenoides.



Figura 9: tren valvular electromagnético [8]

La unidad de control de las válvulas provee las posiciones angulares del cigüeñal para la apertura y cierre de cada válvula, controla la magnitud y la velocidad de los desplazamientos de ascenso y descenso. El control considera la holgura de la válvula, el tiempo de retraso del núcleo y la duración real del proceso de conmutación para el punto de operación seleccionado.

Con la introducción del tren valvular electromecánico el árbol de levas y la mariposa de gases ya no se necesitan; la carga del motor no se efectúa con la válvula de mariposa, sino variando el tiempo valvular; se pueden separar los ciclos de trabajo de los cilindros individuales del motor, permitiendo diseñar estrategias óptimas para el control de la carga transitoria y para la desactivación parcial o total de los cilindros; son infinitas las posibilidades de control del momento torsor.

Método de inversión

En los conjuntos a veces es conveniente cambiar las funciones de las piezas, por ejemplo, la pieza conductora tornarla conducida, la pieza guía hacerla dirigida, la pieza hembra hacerla macho, la pieza móvil hacerla inmóvil, etc. Es racional a veces invertir la forma de las piezas, por ejemplo, reemplazar un cono externo por uno interno, una superficie esférica convexa por una cóncava. En algunas piezas es ventajoso desplazar los elementos constructivos de una pieza a otra, por ejemplo, una chaveta del árbol a la manzana o de las superficies planas de un balancín al seguidor.

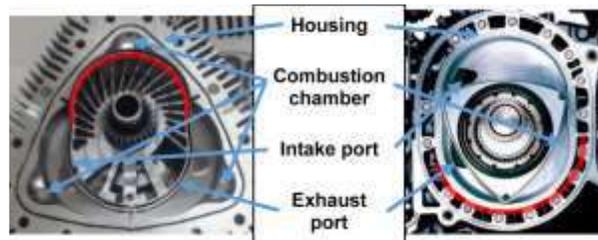


Figura 10: comparación entre el motor "X" y el motor Wankel [9]

Un ejemplo reciente e interesante lo constituye la propuesta del motor "X" de la empresa LiquidPiston, en el cual el rotor tiene la misma forma epitrocoide que el estator-carcasa del motor Wankel (figura 10).



Cada vez el diseño toma nuevas propiedades y el equipo de diseño debe balancear las ventajas y defectos de las variantes inicial e invertida, considerando la fiabilidad, la tecnologicidad, la comodidad de explotación y elegir la mejor de ellas.

Estandarización y unificación en el diseño

La reducción del costo de la producción manufacturera representa una tarea compleja, una tarea constructiva y de producción. La racionalización constituye el principal papel de la producción (la mecanización y automatización de los procesos productivos, la concentración de las operaciones tecnológicas, la especialización de las fábricas, la cooperación productiva, etc.)

Tiene gran importancia la reducción del número de medidas tipo de las máquinas, seleccionando racionalmente su tipaje y sus parámetros, lo que permite elevar el factor de serie de producción, ganando en el costo de fabricación. Esta es también una tarea de diseño. Los fabricantes de aviones como la Boeing y Airbus Industries, por ejemplo, utilizan los mismos componentes para las alas, la nariz y la cola para balancear varios modelos, utilizando diferentes módulos de fuselaje para crear naves de diferentes longitudes y capacidades de pasajeros / carga.

Con la estandarización y la unificación en el diseño se obtiene un gran efecto económico. La unificación de los elementos constructivos permite reducir la nomenclatura de la herramienta de elaboración, medición y montaje. Se unifican las uniones lisas (diámetros, ajustes y exactitud de las medidas), las uniones roscadas (según los diámetros, tipos de roscas, ajustes y exactitud de las dimensiones, las medidas de las llaves), las uniones por chaveta y las estriadas (por los diámetros, las formas de las chavetas y de las estrías, los ajustes y exactitud de las medidas), las transmisiones dentadas (por los módulos, los tipos de dientes y la exactitud de las dimensiones), los chaflanes y los radios de acuerdo. La unificación de las marcas y del tipo de material, los electrodos, las medidas tipo de los elementos de unión, de los rodamientos y otros elementos estándar facilita el aprovisionamiento de la fábrica y los talleres de reparación.

La estandarización es la reglamentación del diseño y de las medidas tipo de las piezas, módulos y bloques de las máquinas. Casi cada rama especializada de la industria tiene piezas y módulos estandarizados. La estandarización acelera el diseño, facilita la fabricación, la explotación y la reparación de las máquinas y, si el diseño de las piezas estándar es racional, contribuye a elevar la fiabilidad de las máquinas. Los procesos y métodos de diseño son estandarizados así, por ejemplo, el estándar ISO 6336 en sus diferentes apartes define el procedimiento de cálculo de las transmisiones dentadas.

Herramientas de computación para el diseño

El desarrollo y la fabricación de los productos, englobadas en lo que se conoce como gestión del ciclo de vida del producto (PLM), son actividades integradas y actualmente digitalizadas (virtualizadas), con posibilidad de trabajarse de manera colaborativa en red a nivel extendido en este momento de la *cuarta revolución industrial* o del “*Internet de las Cosas*”. Al momento actual los tecnólogos e ingenieros, para uso individual, disponen de una generosa oferta de herramientas para el diseño multicuerpo y multifísico, diseño mecánico, selección de materiales, documentación 2D/3D, simulación, análisis de elementos finitos FEM-CAE, manufactura CAM-CNC, ingeniería inversa, metrología dimensional e inspección de calidad, software especializado según el campo de aplicación. Más allá del uso personalizado, en las empresas que deseen ser competitivas, ya es en sí obligatoria la implementación de estrategias informáticas para la gestión de la información, procesos, sistemas de negocio y personas durante todo el ciclo de vida de sus productos, desde la concepción, el diseño y la fabricación, hasta la explotación y el reciclado. En



la gestión moderna del ciclo de vida del producto convergen la Administración de datos de productos (PDM), el diseño asistido por computador (CAD), la Fabricación asistida por computador (CAM), la Simulación e Ingeniería asistida por computadora (CAE) en 3D, la Simulación de los sistemas mecatrónicos (1D CAE), el Análisis de elementos finitos (FEA), los Análisis y pruebas modales, la Manufactura digital, el Control de calidad, el Mantenimiento asistido y la Gestión de operaciones de fabricación (MOM).

En alianza con proveedores de soluciones PLM, las empresas extendidas de clase mundial desarrollan sus trabajos de diseño de productos a lo largo de las 24 horas del día, en modo de ingeniería simultánea, favorecido por la adecuación de *teamcenters* con servidores independientes para cada región según los husos horarios con sincronización automática de las actividades durante la noche para las sucursales en zona nocturna, pero con habilitación de sincronización manual en cualquier momento. Entre los proveedores de PLM pueden nombrarse Agile Advantage de Oracle, Arena de Arena Solutions, SAP PLM de SAP y Teamcenter Engineering de Siemens PLM Software, entre otros.

La oferta PLM de Siemens cubre todas las etapas de desarrollo del producto desde su concepción, incluyendo el modelado virtual multicuerpo, el modelado multifísico, el modelado conjugado estructural y térmico, el modelado de todas las actividades de manufactura, producción, automatización y control, a través de sus productos: **Active Integration** (provee la estructura colaborativa de intercambio de información entre los teamcenters y los otros sistemas de aplicación), **Additive Manufacturing** (digitalización, optimización topológica e impresión 3D), **Catchbook** (herramienta de bosquejo), **Femap** (modelado térmico y fluídico avanzado), **Fibersim** (modelado y manufactura de productos compuestos), **LMS** (provee la simulación de productos mecatrónicos en todas sus fases desde el la dinámica de sistemas, la integridad estructural, las propiedades sonoras, durabilidad, seguridad y consumo de potencia), **Mastertrim** (amoblado de interiores de vehículos), **NX** (plataforma integral de modelado y simulación convergente y manufactura rápida en todas las etapas de desarrollo del producto), **Omneo** (*suite* basada en la nube como software de servicio para el desempeño de la cadena de valor global), **Quality Planning Environment**, **Simcenter** (combina la simulación de sistemas mecatrónicos y habilita la simulación en lazo con el hardware “HIL”, la integración en las interfaces CFD y también el modelado y pruebas CAE 3D para predecir el desempeño de todos los atributos críticos a lo largo de todo el ciclo de vida del producto), **Syncrofit** (solución única integral para el modelado integral de ensambles y estructuras mediante uniones con remaches y otros procedimientos afines), **Teamcenter**, **Tecnomatix** (portafolio integral de todas las soluciones digitales, incluyendo todas las actividades de la planeación y simulación de la manufactura y la producción y el software basado en la red para la colaboración y compartimiento de conocimiento entre departamentos y fábricas empleando las bondades de los sistemas de información geográfica, GIS) [10].



Figura 11: presentación de una pantalla de espacio de modelado dinámico de automóviles en el ambiente Amesim de la suite LMS [10]

El programa **Integrated Car Engineer** (I. C. E.), desarrollado por Massachusetts-based Concentra Corporation, U.K.-based Lotus Engineering y Singapore-based Tata Technologies, realiza automáticamente el análisis y el diseño durante la etapa de diseño conceptual de un vehículo. Dentro de un ambiente de automatización de ingeniería, I.C.E. usa códigos de diseño, legislaciones mundiales de seguridad, regulaciones para vehículos, estándares SAE y otros, principios generales de ingeniería, información de manufactura y aspectos de mercadeo específicos. Los ingenieros pueden evaluar varios prototipos virtuales y variaciones de plataforma. Los tiempos de análisis se han reducido mucho con relación a los métodos tradicionales asistidos por paquetes “CAD/CAM”. El análisis conceptual del diseño de la suspensión se ha reducido de 8 – 12 semanas a 8 horas, mientras que el análisis del limpiabrisas se redujo de tres días a 3 minutos.

Programas de análisis como **CATIA I-DEAS**, **Pro/ENGINEER** y las herramientas de diseño de **Unigraphics** facilitan la creación de superficies de forma libre a partir de curvas, superficies o datos medidos utilizando un ambiente de diseño flexible, permitiendo explorar las implicaciones estéticas y de ingeniería del diseño; sus herramientas de diagnóstico facilitan la visualización de secciones, líneas de reflexión, impresiones especulares, impresiones de curvas para detectar imperfecciones en el proceso de diseño. Las herramientas de validación del programa también incluyen chequeo de maquinabilidad, líneas de partición y chequeo de holguras de superficies; se utilizan para crear modelos 3-D math de prototipos físicos a partir de importaciones escaneadas.

Se diría que en el ambiente académico, en los cursos regulares de Diseño de máquinas, se induce a los estudiantes a la utilización de **Ansys**, un ecosistema de programas CAE para diseño, análisis y simulación de partes por elementos finitos FEA, que facilita las etapas de preparación de mallado, ejecución y post-proceso; la herramienta habilita el análisis modal, el análisis de esfuerzos, deformaciones bajo cargas mecánicas y termofluidicas. **Fe-safe** es un programa muy completo empleado para calcular esfuerzos multiaxiales de fatiga surgidos en piezas sometidas a cargas variables.

Para el análisis de estampado y conformado de lámina se emplea el programa **Autoform**; **Cadmould 3D-F** es uno de los programas de simulación de inyección de plásticos por elementos finitos más usado en Alemania; últimamente ha tomado mucha fuerza la utilización **Comsol**, un software CAE para modelado, análisis y simulación 3D en ingeniería de fenómenos fluidicos, estructurales, térmicos, electromecánicos, con interfaces para diferentes programas CAD y una serie de módulos por aplicación y solvers específicos para solución multifísica de problemas de ingeniería.



DANTE es un programa CAE diseñado para diseñar y evaluar procesos de tratamientos térmicos y ayuda a predecir los efectos de la microestructura, química y las variables de proceso sobre estos parámetros. **Deform 3D** es una herramienta diseñada para análisis de flujo tridimensional en los procesos de conformado de metales, ofreciendo información visual sobre el material, los efectos térmicos durante el proceso sobre las piezas y los herramientas.

En colaboración con el Departamento de Ingeniería de la Universidad de Cambridge, Granta Design Limited ha desarrollado un sistema de base de datos, denominado **Cambridge Engineering Selector** (CES3), que habilita a los ingenieros a cuadrar sus necesidades de diseño con los mejores materiales, las mejores formas y las mejores rutas de manufactura disponibles. El programa está diseñado para ayudar a los ingenieros en los requisitos de diseño exigentes, la gerencia de la información relacionada con los materiales, los procesos, las formas, secciones estructurales, equipos para procesamiento, los componentes estándar, y otras bases de datos de ingeniería y para la educación. El sistema se compone de seis partes principales: un selector; la base de datos CES, la cual comprende siete grandes tablas de datos de información validada de gran calidad: materiales, procesos de manufactura, secciones estructurales, proveedores, referencias, usos y sectores industriales; el constructor o “kit” de desarrollo del CES3; “*inDepth*”, el cual contiene metodología de diseño, bases de datos, información de referencia y casos de estudio interactivos; el “Viewer” y los “Weblinks”, el cual provee acceso a información de elevada calidad en CD-ROM y en la red.

Conviene comentar que en los procesos de diseño de mecánico la herramienta **Excel**® merece una atención permanente, dado que está disponible en todos los computadores, es simple de usar y sirve para sistematizar toda la secuencia de tareas y cálculos de síntesis de diseño, siendo particularmente valioso el *Solver* de esta hoja de cálculo. En la misma red se encuentran sistematizaciones gratuitas o de bajo costo para el cálculo de elementos de máquinas, como es el caso de **MitCalc** [11]. Aparte de la información contenida en los textos, las herramientas computacionales usualmente contienen información y literatura técnica muy completa y actualizada sobre los elementos de diseño, sus particularidades, teorías y criterios de cálculo, aparte de información y catálogos de proveedores comerciales nacionales e internacionales. También es valiosa y completa la información técnica y científica en los temas de Diseño de Máquinas contenida en páginas como <http://www.engineersedge.com>.

Teoría “TRIZ” para la solución de problemas de inventiva.

Entre las alternativas que tienen los cursos modernos de Diseño, la discusión sobre los métodos y estrategias para la generación de ideas solución ocupa un lugar importante. Son varias las técnicas propuestas y entre las más utilizadas figuran la *lluvia de ideas*, *uso de analogías*, *matrices combinatorias*, *técnicas prospectivas complementarias*, *biomimética*, *brainsailing*, *Phillips 66*, *Gordon*, *fish pool* y *Análisis de Categorías*. Una herramienta de creatividad muy usada en el mundo industrial actualmente es la Teoría de Solución de problemas de Inventiva, “TRIZ”. En los años 50 Genrich S. Altsuller y sus colegas en la Unión Soviética desarrollaron esa teoría y desde entonces ha tenido mucha aplicación en las etapas de creación de productos, de solución de problemas técnicos y en la gestión de escenarios para la innovación [3]. A continuación, se comentan algunos elementos de esta herramienta y que es valiosa en los procesos académicos.

Diferentes inventores han tenido su propio tratamiento respecto del arte de la inventiva, pero el proceso frecuentemente es función de la ocasión o circunstancia. Para superar este obstáculo



Altshuller examinó un extenso número de patentes, buscando destacar las verdaderas invenciones creativas con el fin de formular un tratamiento metodológico para los problemas de inventiva. Altshuller encontró que, entre toda la variedad de campos técnicos, el número de patentes de invención resultan de emplear uno o más de cerca de 40 principios fundamentales y que las soluciones conocidas para un campo pueden ser reinventadas en otro.

1	Peso de un objeto en movimiento	21	Potencia
2	Peso de un objeto estacionario	22	Facilidad de trabajo
3	Longitud de un objeto móvil	23	Facilidad de montaje
4	Longitud de un objeto estacionario	24	Facilidad de información
5	Área de un objeto en movimiento	25	Facilidad de tiempo
6	Área de un objeto estacionario	26	Cualidad de sustancia o materia
7	Volumen de un objeto en movimiento	27	Contabilidad
8	Volumen de un objeto estacionario	28	Precisión en la medida
9	Velocidad	29	Precisión en la manufactura
10	Fuerza	30	Dañó mismo que afecta a un objeto
11	Elasticidad o presión	31	Dañó generado por el propio objeto
12	Forma	32	Manejaibilidad o facilidad para la fabricación
13	Estabilidad del objeto	33	Facilidad de operación
14	Estabilidad	34	Facilidad de reparación
15	Durabilidad de un objeto estacionario	35	Adaptabilidad
16	Durabilidad de un objeto en movimiento	36	Complejidad del Objeto
17	Temperatura	37	Complejidad de control
18	Balla	38	Nivel de automatización
19	Energía perdida por un objeto estacionario	39	Alcance de invento
20	Energía perdida por un objeto en movimiento	40	Capacidad / Productividad

Figura 12: 40 Principios de inventiva en la teoría TRIZ [3]

Altshuller caracterizó las técnicas en la solución de problemas de patentes en cinco niveles de inventiva:

Nivel 1. Empleo de métodos suficientemente conocidos dentro de una especialidad o compañía para resolver problemas rutinarios de diseño; **nivel 2.** Correcciones menores a sistemas existentes realizadas con métodos ya conocidos en la industria; **nivel 3.** Mejoramientos fundamentales que se apoyan en métodos de otras industrias para resolver una contradicción; **nivel 4.** Nuevas generaciones de inventos fundamentados en un nuevo principio científico (antes que tecnológico) para ejecutar la función principal de un sistema; **nivel 5.** Descubrimientos científicos extraordinarios o las invenciones pioneras de un sistema esencialmente nuevo.

Cada nivel subsiguiente representa un incremento en el conocimiento requerido para el inventor, la altura de las barreras psicológica que el inventor debe superar, y el beneficio (repercusión) potencial de la invención. Altshuller buscó una metodología que superara las barreras psicológicas, de manera que se estimularan las soluciones de elevado nivel. Gracias a sus investigaciones encontró un método que depende de tres principios principales: **la evolución de los sistemas, la resolución de las contradicciones, y el resultado ideal.**

La realización de las celdas de combustible, puede inscribirse en el nivel 5 de inventiva. Las celdas de combustible constituyen una tecnología de otra esfera de la producción, fuera de los motores de combustión interna, que hoy hace posible de nuevo la propulsión eléctrica en los vehículos. El motor de combustión interna se impuso sobre el motor eléctrico, a pesar de éste llevar mayor tiempo de desarrollo. Hoy, con la maduración tecnológica de las celdas de combustible y con el desarrollo tecnológico de las membranas de intercambio iónico y la exploración de alternativas, se van creando las condiciones para que se produzca comercialmente el vehículo de tracción eléctrica.

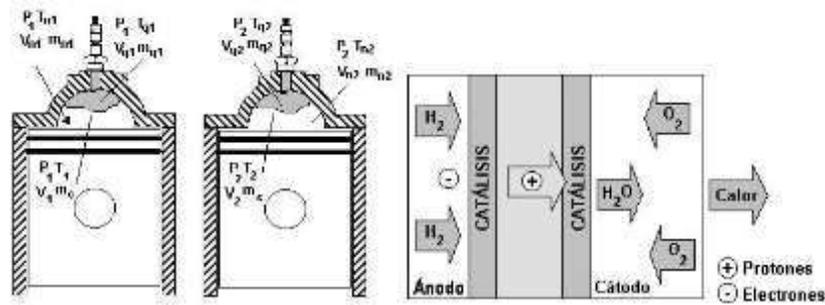


Figura 13: evolución de los principios utilizados para realizar la energía química de los combustibles. Motor de combustión (arriba) y celda de combustible (abajo)

El concepto básico de la contradicción de la TRIZ es la resolución de las contradicciones. Frecuentemente la resolución de una contradicción depende de la determinación de los problemas físicos que constituyen la raíz escondida de la dificultad técnica. Por ejemplo, un área grande en el ala de un avión facilita su despegue; sin embargo, el tamaño elevado genera una resistencia aerodinámica a velocidades supersónicas. Las alas retráctiles constituyen una manera de resolver la contradicción.

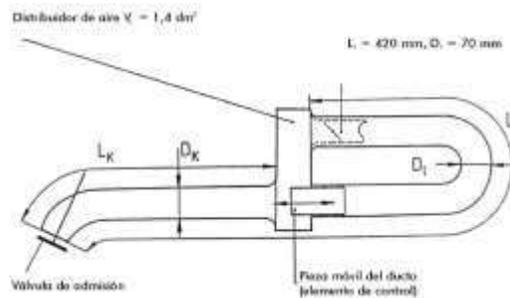


Figura 14: configuración de múltiple de admisión variable en los motores de combustión

Como otro ejemplo puede citarse el diseño de los múltiples de admisión, los cuales deben tener capacitancia y resistencia variable en función de la velocidad angular del cigüeñal. Una solución constructiva que se emplea hoy es la instalación de múltiples de configuración variable, como el de la figura 14.

Las características de un sistema tecnológico dado cambian de manera predecible a medida que evoluciona y madura en el tiempo. Altshuller y su colega Boris Zlotin categorizaron esta evolución en siete reglas:

1. Inicialmente unos subsistemas del sistema se desarrollan vertiginosamente, dando lugar a contradicciones. Los unos con ciclos de vida de movimiento más lento retrasan la evolución de todo el sistema.
2. A medida que el sistema madura se torna más dinámico y controlable, y el flujo de energía y de información en el sistema se optimiza.
3. El sistema inicialmente crece en complejidad, pero luego se vuelve más sencillo gracias a la integración. (como ejemplo puede verse la evolución en la integración de los componentes que se ha venido dando en los sistemas de potencia fluida, como lo ilustra la figura 15).

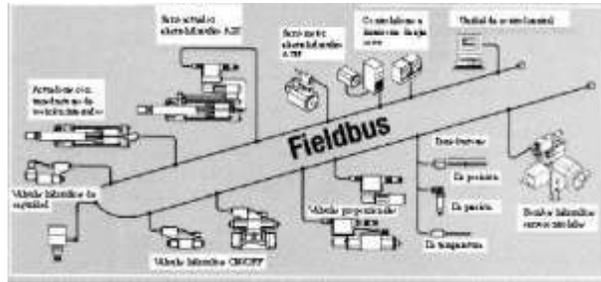


Figura 15: esquema de integración de componentes con el sistema de comunicación y control en los mandos electrohidráulicos [6]

4. Los módulos cambian de partes no coordinadas a diseños integrados y, finalmente, a partes con características que pueden ser cambiadas o ajustadas de forma dinámica.
5. Tiene lugar una transición de la concentración sobre objetos macroscópicos en el sistema a microscópicos, lo cual frecuentemente produce una mejor operación y un mejor control.
6. La intervención del hombre (operador) desciende a medida que crece la automatización.
7. El sistema se vuelve un subsistema de un sistema más generalizado que es cercano al *sistema ideal*.

Por ejemplo, la computadora multimedia moderna se está acercando rápidamente a su ideal, realizando las funciones de televisión, teléfono, máquina fax, centro de entretenimiento, etc. y tiene un peso y un precio que son miles de veces inferiores a los de las estructuras de las computadoras originales.

Conclusiones

En este artículo se detallaron y se dieron ejemplos de algunos principios metodológicos de diseño. Se comentó el papel de las herramientas computacionales como aceleradoras de los procesos de diseño y manufactura. Se divulgaron algunas generalidades de la teoría “TRIZ”, o teoría para la solución de problemas de inventiva, como herramienta para el diseño conceptual.

Referencias

- [1] ORLOV P. I. “Fundamentos de Diseño. Mashinostroenie”. Moscú, 1988.
- [2] BUCHHOLZ, K. “The hidden design advantage: manufacturing input”. Automotive Engineering, agosto, 1997, pg. 57 – 59. SAE. Warrandale, 1997.
- [3] SAVRANSKY, S. D. y CRAIG, S. TRIZ: “The Methodology of Inventive Problem Solving”. The Industrial Physicist, diciembre, 1996; pg. 22 – 25. One Physics Ellipse.
- [4] Variable Valve Actuation 2001. SP – 1599. SAE. Warrandale, 2001.
- [5] BEKMAN V. V. “Automóviles Deportivos”. Mashinostroenie. Moscú, 1980.



La Manufactura y el Estándar Internacional ISO 16100-1

Manufacturing and the International Standard ISO 16100-1

Edgar Alonso Salazar Marín^{1, γ}, Carlos Alberto Romero Piedrahita^{1, γ}

1. Programa de Tecnología Mecánica, Facultad de Tecnología, Universidad Tecnológica de Pereira,
Pereira, Colombia

γ. Autor corresponsal: cromero@utp.edu.co, edgarsalazar@utp.edu.co

Resumen

La industria manufactura en las áreas de los automóviles, la aviación, la fabricación de máquinas herramienta y la industria de fabricación de moldes y utillajes, entre otros sectores importantes, en las cuales es amplia la utilización de herramientas computacionales CAD, CAE, CAM, ERP, CAPP, PLM, tiene relación unívoca con las áreas de diseño, fabricación, producción, pruebas y niveles de automatización en los que podríamos subdividir también los perfiles profesionales y ocupacionales de los programas de ingenierías y tecnologías. En un intento por posicionar el papel de la manufactura en la formación de profesionales, en este trabajo se presenta el estándar ISO 16100 como una plataforma diferenciadora y justificadora de perfiles profesionales en las empresas, aparte de su destinación principal de definir los requisitos que deben poseer los programas computacionales a implementar en las sistemas integrados de manufactura, CIM.

Palabras claves: Automatización, Estándar ISO, Manufactura, CIM.

Abstract

The manufacturing industry in the areas of automobiles, aviation, the manufacture of machine tools and the industry of manufacture of molds and tooling, among other important sectors, in which the use of computational tools CAD, CAE, CAM, ERP is extensive, CAPP, PLM, has a univocal relationship with the areas of design, manufacturing, production, testing and levels of automation in which we could also subdivide professional and occupational profiles of engineering and technology programs. In an attempt to position the role of manufacturing in the training of professionals, this paper presents the ISO 16100 standard as a differentiating and justifying platform of professional profiles in companies, apart from its main purpose of defining the requirements that must have the computer programs to be implemented in the integrated manufacturing systems, CIM.

Keywords: Automation, ISO Standard, Manufacturing, CIM.

Introducción

A la necesidad de mayores velocidades y esfuerzos, la búsqueda por elevar los indicadores técnico económicos de operación de las máquinas y los procesos; y por lograr la operación en regímenes óptimos de las máquinas y los mecanismos, se debe la aparición de los primeros sistemas de regulación y control automáticos. Los sistemas de regulación evolucionaron en las máquinas y algunos de sus principios y modelos se extendieron a los procesos y luego a la totalidad de la empresa. Con la revolución industrial se inicia la concepción de las fábricas de producción en masa.



Se dieron los perfeccionamientos tecnológicos como resultado de la evolución científico – tecnológica. El crecimiento cuantitativo y cualitativo de los sistemas de producción creó y continúa creando las condiciones para mecanizar y automatizar los trabajos en todas las esferas de la economía, para elevar la productividad y reducir los gastos de producción. Sobre la base de las teorías de regulación y control automáticos aparecieron y continúan desarrollándose nuevas direcciones o ramas de la automática, por ejemplo, los sistemas automatizados de control de la producción de la empresa, los sistemas de economía de las ciudades, el sistema vial en las grandes ciudades. En estos sistemas se emplean modernos métodos matemáticos y medios técnicos de recolección, almacenamiento, conservación, procesamiento y utilización de información con el fin de tener en cuenta, analizar, planear, organizar y otras operaciones de la actividad productiva, económica y científica.

Con la entrada de los controladores y los computadores en los sistemas de producción la información como recurso de la producción ocupó un lugar que no había ocupado antes. El manejo de la información empezó a ser tan importante como el manejo de los materiales y la energía en la planta. Se generaron las posibilidades de integrar los procesos de producción mediante el computador, dando paso a los CIM. La información llega a ser la tercera dimensión en la industria automatizada. En el pasado las otras dos dimensiones, la materia y la energía, representaban el único objeto de optimización continua. Hoy el estándar ISO 16100 especifica el modelo de información de la manufactura que caracteriza los requisitos de software e interfaz que se han de utilizar en los sistemas integrados de manufactura. Con requisitos de interfaz claramente expresados se pueden desarrollar interfaces estándar de manera más fácil y rápida utilizando el Lenguaje de Definición de Interfaz, IDL (Interface Definition Language) o un lenguaje de programación apropiado como Java y C++. Se espera que estas interfaces estándar faciliten la interoperabilidad entre las herramientas de software de manufactura (módulos o sistemas).

Descripción del estándar ISO 16100

El lenguaje de modelado unificado (UML) se usa en este Estándar Internacional para modelar las interfaces. El modelo de información de manufactura también puede usarse para desarrollar esquemas de bases de datos comunes compartidas usando lenguajes como el Lenguaje de Marcado Extensible, XML (eXtensible Markup Language).

Sectores de la industria de la manufactura (como el automotor, el aeroespacial, manufactura de máquinas herramientas, manufactura de periféricos para computadores y manufactura de moldes y troqueles) que hacen uso intensivo del diseño asistido por computador (CAD), la manufactura asistida por computador (CAM), programación de control numérico (NC), la ingeniería asistida por computador (CAE), la planeación de recursos de manufactura (ERP), la gestión de información del producto (PDM) y los sistemas de ejecución de manufactura (MES) se benefician directamente del ISO 16100. Los requisitos de interfaz del software en el ISO 16100 facilitan el desarrollo de:

- a) herramientas de software de diseño y manufactura interoperable que permitan reducir el tiempo de desarrollo del producto;
- b) nuevas herramientas de software que pueden integrarse fácilmente con las tecnologías actuales permitiendo más oportunidades en el mercado;
- c) nuevas aplicaciones de software que permitan reducir los gastos de capital en el reemplazo de sistemas tradicionales;
- d) interfaces de programación y esquemas de bases de datos que permitan reducir los costos al no tener que desarrollar interfaces propias para integración de software punto a punto.



El resultado final es la reducción en los costos de manejo de la información del producto y la manufactura y costos más bajos de los productos.

El ISO 16100 habilita la integración de software de manufactura proveyendo lo siguiente:

- a) especificaciones de interfaz estándar que permiten el intercambio de información entre las unidades de software en los sistemas de automatización industrial desarrollados por diferentes vendedores;
- b) perfiles de capacidad del software, usando un método estandarizado para facilitarle a los usuarios seleccionar las unidades de software que cumplan con los requisitos funcionales;
- c) pruebas de conformidad que aseguren la integridad de la integración del software.

El ISO 16100 se compone de cuatro partes. La parte 1 especifica la estructura para la interoperabilidad de un juego de productos de software de manufactura usados en el dominio de la manufactura y su integración en la aplicación de manufactura. La parte 2 especifica una metodología para construir los perfiles de las características del software de manufactura, e incluye una metodología para crear los perfiles de las características del software de manufactura, lo mismo que la utilización de estos perfiles en la etapa de desarrollo de las aplicaciones de manufactura. La parte 3 especifica el protocolo de interfaz y las plantillas para varias áreas de aplicación de la manufactura. La parte 4 especifica los conceptos y las reglas para la valoración de conformidad de las otras partes del ISO 16100.

La parte 1 del ISO 16100 especifica una estructura para la interoperabilidad de un conjunto de productos de software usados en el dominio de la manufactura y para facilitar su integración dentro de las aplicaciones de manufactura. Esta estructura se enfoca a los modelos de intercambio de información, modelos de objeto de software, interfaces, servicios, protocolos, perfiles de características y métodos de prueba de conformidad. Para la aplicación del ISO 16100 es indispensable la observación de los siguientes documentos: ISO 15704, Sistemas de automatización industrial – requisitos para referencias de interfaces de arquitecturas y metodologías; ISO 15745-1, Sistemas de automatización industrial e integración – estructura de integración de aplicación de sistemas abiertos – parte 1: descripción genérica de referencia; ISO/IEC 1950-1, Tecnología de información – Lenguaje de modelado unificado (UML) – parte 1: especificación; IEC 62264-1, integración de sistemas de control de empresa – parte 1: modelos y terminología; IEEE 1320.1 – 1998, Estándar para el lenguaje de modelado funcional – Sintaxis y semántica para la recomendación IDEFO W3C de febrero de 1998, Lenguaje de marcado extensible (XML) 1.0.

Aplicación a la manufactura

Estructura de aplicación de referencia

La estructura de interoperabilidad del software para manufactura se basa en una estructura de interoperabilidad más general para aplicaciones de manufactura. Tal estructura de interoperabilidad de aplicación, la cual se explica en mayor detalle en el ISO 15745-1, provee la base para integrar una arquitectura de sistema de automatización y control dentro de una arquitectura de aplicación de manufactura.

Una aplicación de manufactura integrada debe ser modelada como combinación de un juego de recursos de manufactura y un juego de unidades de información cuya estructura de datos, semántica y comportamiento pueden ser compartidos e intercambiados entre los recursos de manufactura, como se muestra en la figura 1. Los recursos de manufactura son las redes de comunicación, los dispositivos, el



software, el equipo, material y personal necesario para soportar los procesos e intercambios de información requeridos por la aplicación.

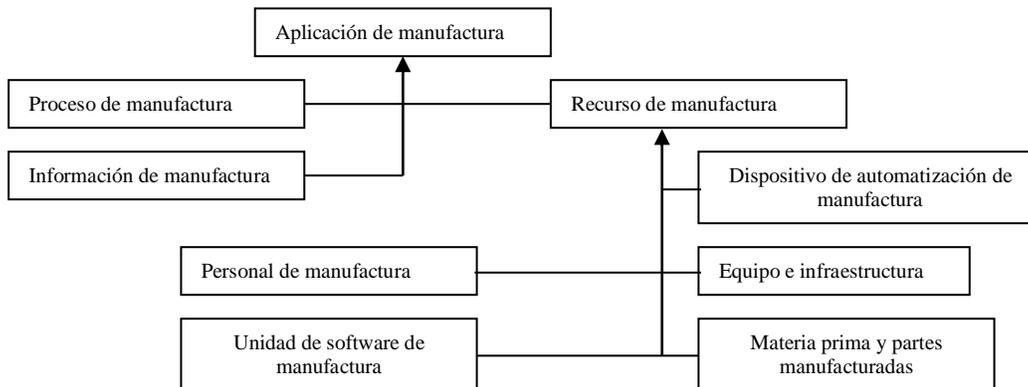


Figura 1: diagrama de modelo parcial de una aplicación de manufactura.

En este modelo de integración de aplicación, los diferentes componentes del modelo comparten interfaces e intercambian material, energía e información de un modo cooperativo y coordinado. Los procesos de manufactura pueden cooperar si las funciones realizadas por varios elementos del modelo pueden interactuar entre ellas. Cuando las unidades de software efectúan algunas de estas funciones, es necesario que ellas interactúen con otros elementos y con ellas mismas.

Dominio de manufactura

El dominio de manufactura, que incluye el control discreto, de lotes y continuo, abarca varios tipos de industria. La industria automotriz es un ejemplo de aplicación de control discreto, la industria farmacéutica emplea control por lotes, la industria petroquímica emplea control continuo. Para el software de manufactura interfaz entre los sistemas de gestión de planta y sistemas de control de taller se describe por el mismo método independiente de que el control sea discreto, por lotes o continuo. El flujo de control dentro de un sistema de control también se describe por el mismo método al margen de que se trate de un sistema discreto, por lotes o continuo.

Como el dominio de la manufactura se aplica a varias industrias, la relación entre las firmas en estas industrias está cambiando rápidamente debido a los desarrollos recientes en la infraestructura de la tecnología de información, como es el caso de los sistemas de gestión de la cadena de suministros. Así, el ISO 16100 fija un dominio de manufactura objetivo para incluir la operación de la manufactura y la actividad de control, la actividad de control discreto, la actividad de control de lotes, la actividad de control continuo, y la actividad de diseño del proceso de manufactura, como se muestra en la figura 2.

Procesos de manufactura

Un proceso de manufactura debe ser modelado como un juego de actividades que siguen una secuencia específica. Cada actividad se asocia con un juego de funciones ejecutadas según una programación temporal o disparada por un juego de eventos.

Las funciones asociadas con el proceso de manufactura son vistas como implementaciones acompañadas de recursos de manufactura. Se considera la selección y configuración de los recursos de manufactura para apoyar los flujos de material, información y energía requeridos por la secuencia especificada de las actividades de manufactura asociadas con un proceso.



Recursos de manufactura

Los recursos de manufactura requeridos por una aplicación de manufactura deben organizarse en términos del tipo de flujo manejado y soportado por los procesos de manufactura – flujo de material, control, información o energía. El juego de flujos integrados puede usarse para representar una aplicación de manufactura integrada o una arquitectura de sistema de manufactura. Las características combinadas de varias unidades de software, en un ambiente de operación apropiado, proveen la funcionalidad requerida para controlar y monitorear los procesos de manufactura de acuerdo al plan de producción y a los recursos localizados. Los recursos de manufactura incluyen dispositivos de procesamiento, almacenamiento, interfaz de usuario, comunicaciones y periféricos, lo mismo que otro software de sistema requerido para la ejecución de las unidades de software.

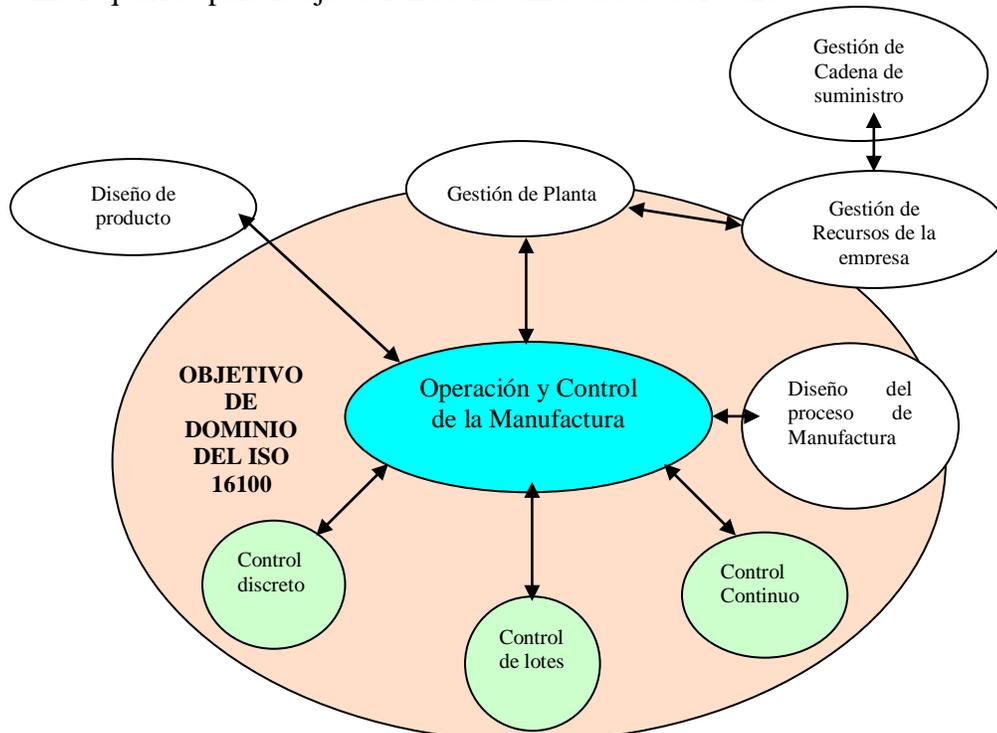


Figura 2. Dominio objetivo del ISO 16100

Información de manufactura

Un juego de estructuras de información provee la infraestructura de conocimiento para manejar los varios tipos de flujos dentro de una aplicación de manufactura. Estos juegos de información incluyen información pertinente al producto, el proceso y el equipo. Las unidades de software de manufactura son el medio principal para manejar, transformar y mantener estas estructuras de información.

Estructura de interoperabilidad del software de manufactura

Interoperabilidad de la unidad del software de manufactura.

Dentro del contexto de una aplicación de manufactura, se considera que una unidad de software de manufactura es capaz de realizar un juego específico de funciones definidas por la arquitectura del sistema de manufactura. Durante la ejecución de estos juegos de funciones la unidad de software de manufactura coopera y conduce transacciones con otras unidades de software de manufactura.



Las funciones realizadas por cada unidad de software son aquellas descritas por la arquitectura de aplicación de manufactura. La información intercambiada entre estas unidades de software habilita la ejecución coordinada de estas funciones de manufactura. La interoperabilidad del software de un juego de actividades de manufactura se describe en términos de la interoperabilidad del juego de unidades de software asociadas con cada actividad de manufactura.

Una estructura de interoperabilidad de software consiste de un juego de elementos y reglas para describir la capacidad de las unidades de software para soportar los requisitos de una aplicación de manufactura. La capacidad para soportar los requisitos debe cubrir la habilidad de la unidad de software para ejecutar e intercambiar información con otras unidades de software operando en el mismo sistema de manufactura o en diferentes sistemas de manufactura usados en la aplicación.

Una estructura de interoperabilidad de software deberá estar basada en los siguientes aspectos:

- a) sintaxis y semántica compartidas entre las unidades de software de manufactura;
- b) relaciones funcionales entre las unidades de software de manufactura;
- c) servicios, interfaces y protocolos ofrecidos por las unidades de software de manufactura;
- d) habilidad para proveer perfiles de características para las unidades de software de manufactura.

Los elementos de la estructura consistirán de los roles, las actividades y los artefactos asociados con las entidades de software relacionadas con los procesos de manufactura, la información y los recursos. Las reglas de la estructura deberán direccionar las relaciones, las plantillas y las cláusulas de conformidad necesarias para construir una clase de capacidad, una clase de perfil y una clase de componente. La figura 3 ilustra las relaciones entre los aspectos de la estructura de interoperabilidad del software y la derivación de esta estructura a partir de la estructura de interoperabilidad de aplicación genérica.

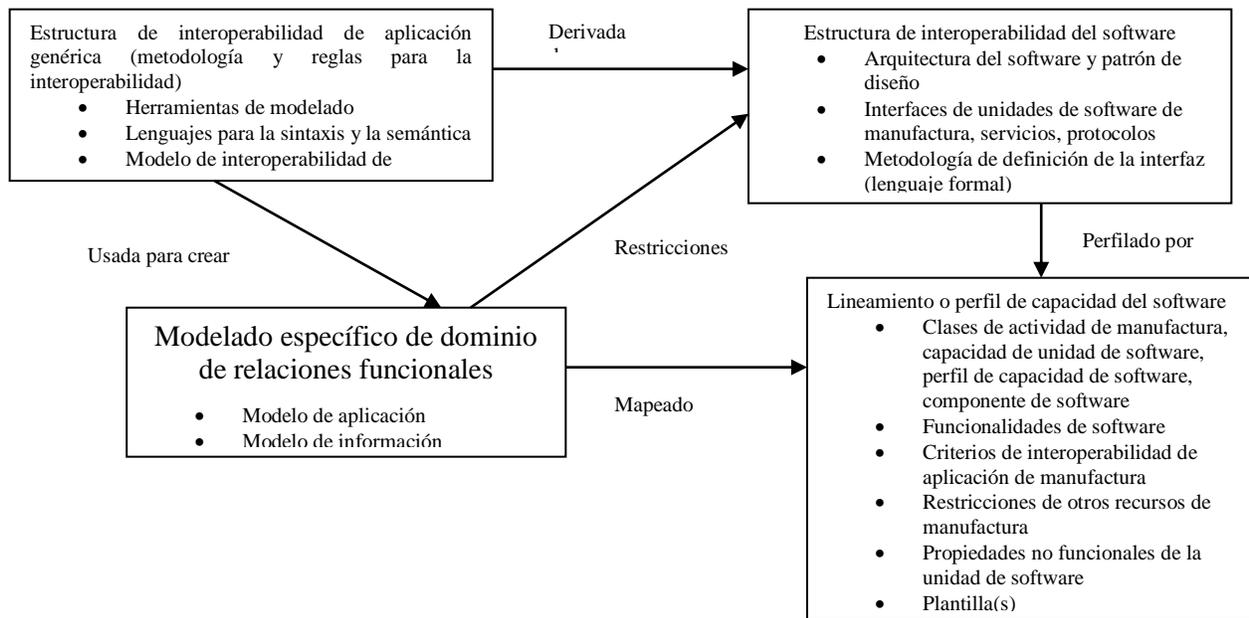


Figura 3. Relaciones de los aspectos de interoperabilidad del software.

Relaciones funcionales entre las unidades de software de manufactura

Dentro del dominio de la manufactura mostrado en la figura 2 puede haber una o más unidades de software operacionales que cooperen a través de una interfaz / protocolo específico para realizar una función de manufactura única requerida en ese dominio. Esto se realiza en el ambiente de software de un sistema de computación específico como uno de los componentes de los recursos de manufactura, habilitado por un patrón de diseño de software específico que realiza un rol específico. Así mismo, una unidad de software única puede realizar una o más funciones de manufactura. Una o más operaciones de manufactura pueden interoperar para ejecutar, controlar, monitorear o gestionar una actividad de manufactura particular. Puede llevarse a cabo una serie de actividades en una secuencia particular para completar un proceso de manufactura.

En esta estructura la secuencia y la programación de las funciones realizadas se determinan por la secuencia y la programación de las actividades que comprenden un proceso particular. Las unidades de software de manufactura desplegadas para realizar las funciones son consideradas ejecutables de acuerdo con la secuencia requerida y la programación de sus funciones asociadas. Las interoperabilidades de los procesos de manufactura se ven en términos de la interoperabilidad de las funciones, lo que a su vez debe verse en términos de la interoperabilidad de los recursos de manufactura, incluyendo las unidades de software de manufactura.

Perfil de capacidad de la unidad de software de manufactura

Debe expresarse una cláusula concisa de la capacidad de la unidad de software de manufactura utilizando un perfil de capacidad. El perfil de capacidad debe incluir la clase de la actividad de manufactura, la función de software realizada, los criterios de aplicación de manufactura, las condiciones de los recursos o configuraciones (habilitadores de software), las unidades de



medida, el nombre de la unidad de software de manufactura, la información intercambiada, la interfaz de servicio y las condiciones de operación asociadas.

Ejemplo:

- Clase de actividad de manufactura: control de producción
- Funciones de software: programación, operación, monitoreo, reporte, alarmas
- Criterios de aplicación de la manufactura: plenitud, manejo de tiempo, exactitud
- Condiciones de recursos o configuraciones: periféricos del sistema en operación, redes, manejadores, monitores de desempeño.
- Unidades de medida: tiempo entre fallos, tiempo promedio hasta la reparación, cantidad de personas requeridas para la reparación (por tipos de habilidades).
- Nombre de la unidad de software de manufactura: lote de empresa RSI.

Frontera de la empresa/control

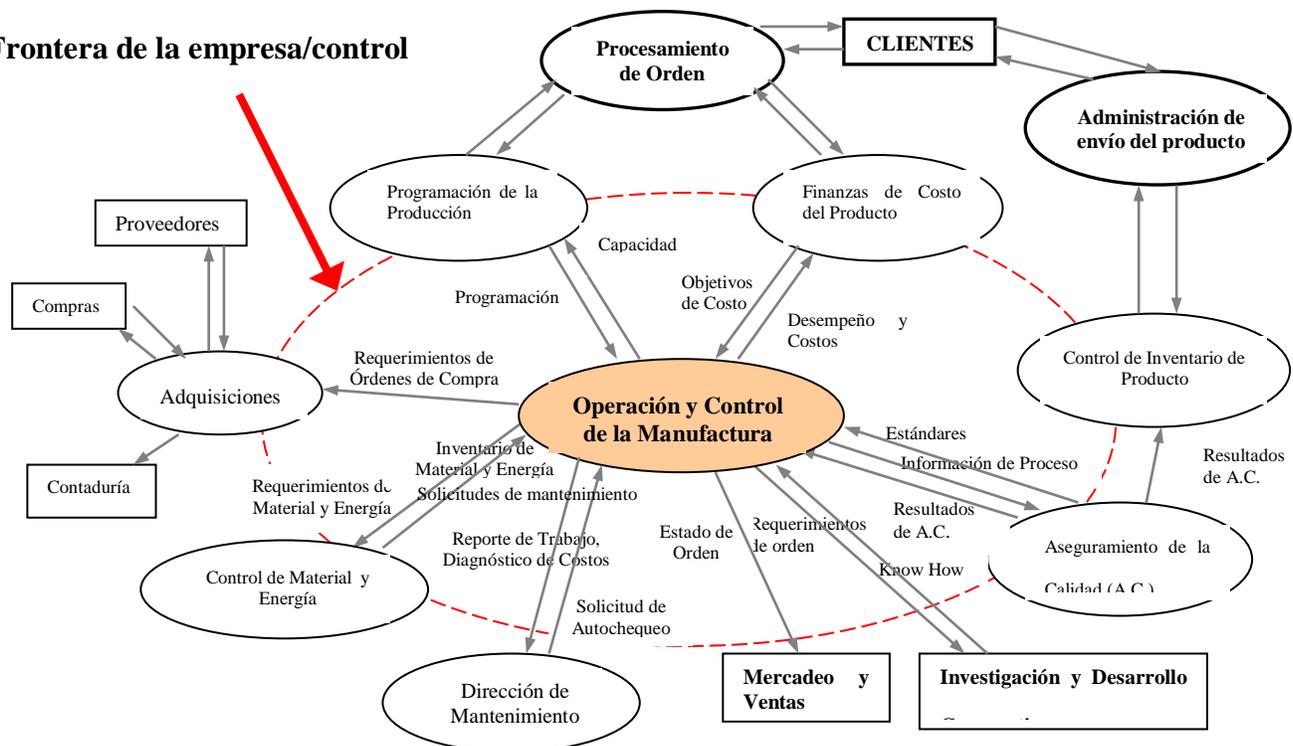


Figura 4: diagrama de actividades del modelo parcial de una aplicación de manufactura

Tendencias del ejercicio profesional del Ingeniero de Manufactura

A nivel macro, el estándar ISO 16100 (Figura 4) define las relaciones existentes en los sistemas integrados de manufactura (SIM): Sistemas de automatización e integración industrial – Lineamientos de interoperabilidad para las características del software de manufactura. (“Industrial automation systems and integration – Manufacturing software capability profiling for interoperability”). Este modelo de información de manufactura también se extiende a la formación en las ingenierías y las tecnologías, define los roles.



En la Figura pueden relacionarse las actividades del *Ingeniero Mecánico tradicional* con el campo de “Diseño de producto”, mientras que el campo de “Ingeniería de proceso” está destinado para un *Ingeniero de Manufactura*. Actualmente esa formación no se imparte y las funciones son cumplidas por ingenieros y tecnólogos mecánicos o ingenieros y tecnólogos industriales que han adquirido conocimiento formal y práctico en las industrias particulares y específicas donde se han desempeñado.

Como el dominio de la manufactura se aplica a varias industrias, la relación entre las firmas en estas industrias está cambiando rápidamente debido a los desarrollos recientes en la infraestructura de las tecnologías de la información y las comunicaciones TIC’s, como es el caso de los sistemas de gestión de la cadena de suministros. Así, el ISO 16100 fija un dominio de manufactura objetivo para incluir la operación de la manufactura y la actividad de control, la actividad de control discreto, la actividad de control de lotes, la actividad de control continuo, y la actividad de diseño del proceso de manufactura.

El estándar ISO 16100-1 especifica el modelo de información de la manufactura que caracteriza los requisitos de software e interfaz que se han de utilizar en los sistemas integrados de manufactura, sectores de la industria de la manufactura (como el automotor, el aeroespacial, manufactura de máquinas herramientas, manufactura de periféricos).

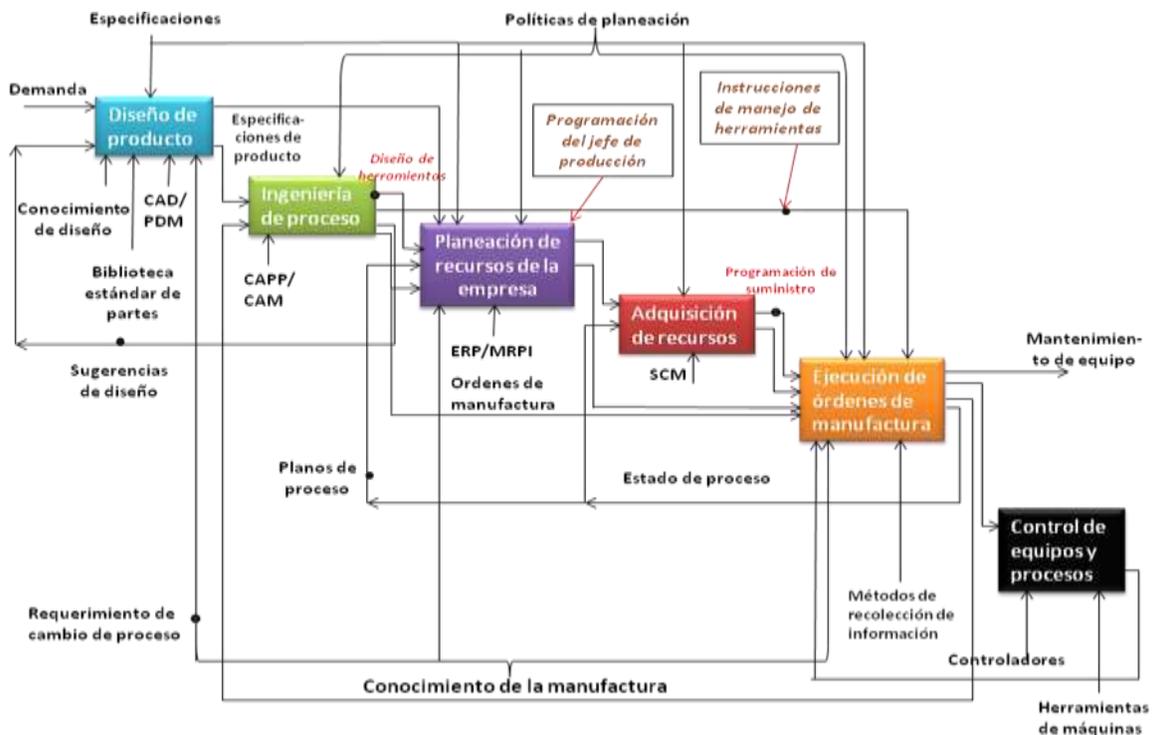


Figura 5. Dominio objetivo del Estándar ISO 16100– 1 para computadores y manufactura de moldes y troqueles) que hacen uso intensivo del diseño asistido por computador (CAD), la manufactura asistida por computador (CAM), programación de control numérico (NC), la ingeniería asistida por computador (CAE), la gestión de información del producto (PDM) y los sistemas de ejecución de manufactura (MES) se benefician directamente del ISO 16100.



Para la aplicación del ISO 16100 es indispensable la aplicación de los siguientes documentos: ISO 15704, Sistemas de automatización industrial – requisitos para referencias de interfaces de arquitecturas y metodologías; ISO 15745-1, Sistemas de automatización industrial e integración – estructura de integración de aplicación de sistemas abiertos – parte 1: descripción genérica de referencia; ISO/IEC 1950-1, Tecnología de información – Lenguaje de modelado unificado (UML) – parte 1: especificación; IEC 62264-1, integración de sistemas de control de empresa – parte 1: modelos y terminología; IEEE 1320.1 – 1998, Estándar para el lenguaje de modelado funcional – Sintaxis y semántica para la recomendación IDEFO W3C de febrero de 1998, Lenguaje de marcado extensible (XML) 1.0.

Educación en manufactura en Colombia

Hasta ahora en Colombia se ha pretendido que la Ingeniería Mecánica, en las diferentes instituciones del país, permita cubrir las áreas básicas de conversión de energía, diseño de equipos y maquinaria y la manufactura de productos. Al mismo tiempo, la formación superior para las actividades de las ingenierías de materiales y metalurgia están contempladas por el Ministerio de Educación Nacional en su Resolución 2773 de 2003. Con estas denominaciones de ingeniería no se cubren los campos demandados para manufactura avanzada de bienes de capital y por esto en la Universidad Tecnológica de Pereira se propone crear el programa de ingeniería de fabricación de bienes de capital y se denomine “*Ingeniería de Manufactura*”.

Para que el país se inserte y sea competitivo en la economía mundial, debe promoverse la creación de programas académicos de formación de estudiantes a nivel de pre y posgrado, y a través de procesos de investigación y desarrollo, en los que de manera estructurada se cubran las áreas específicas tradicionales, avanzadas y futuras destinadas a proponer, diseñar, implementar y evaluar procesos de fabricación (manufactura), inspección y control integrado de partes (metálicas y no metálicas), módulos, sub-ensambles, máquinas, sistemas integrados CIM, herramientas, instrumentales, plantillas, moldes, troqueles y otros que vayan necesitándose conforme con la evolución científico-tecnológica.

La industria colombiana no es ajena a los cambios tecnológicos mundiales, debe adaptarse a las exigencias de la economía mundial, pero está limitada por las deficiencias de capacidad tecnológica y las deficiencia de formación de su capital humano en conocimientos y competencias para adquirir, usar, absorber, adaptar, mejorar y generar nuevas tecnologías (capacidades de innovación y capacidades de absorción tecnológica para su uso). Esto se ha evidenciado en los estudios de caracterización del Sector Metalmeccánico realizados por el SENA, el estudio de la Universidad Nacional (UN. (2008). Estudio de Caracterización Ocupacional del Diseño en la Industria Colombiana, Mesa Sectorial de Diseño - SENA. Sede Bogotá: Universidad Nacional de Colombia), estudios realizados por el Departamento Nacional de Planeación.

El programa “Ingeniería de manufactura”, en su naturaleza de aplicación conduce a la creación y aplicación de know-how de formulación y diseño de métodos y procesos de obtención, mecanización, laminado, deformación, extrusión, inyección, moldeo, acabado, inspección, ensamble, prueba y reciclaje de piezas metálicas y no metálicas y de sus posibles integraciones. El proyecto educativo del programa constituye una respuesta a las necesidades de formación diagnosticadas y contribuye al logro de la misión de la Universidad Tecnológica de Pereira en su



entorno regional y nacional, se encuentra alineado con el Proyecto Educativo Institucional “PEI”, los requerimientos de la ley y la sociedad.

A nivel internacional y nacional se conocen programas relacionados con la manufactura, principalmente programas de posgrado, a nivel de maestría y doctorado. Es creciente el número de programas de pregrado en tópicos relacionados con la manufactura, particularmente en los Estados Unidos. Allí, se ofrecen programas de ingeniería de manufactura en instituciones como Boston University, Oregon State University, Wichita State University, Texas State University; en Inglaterra la Universidad de Loughborough ofrece un programa en Ingeniería de Manufactura.

Del análisis de las ofertas laborales y perfiles ocupacionales demandados por las empresas del país a los ingenieros mecánicos e industriales, se puede concluir que la mayoría de las empresas imaginan que la concepción de los procesos de manufactura, desde la obtención de la pieza verde hasta el control dimensional y funcional de las piezas, pasando por los procesos de mecanizado, pueden ser llevados a cabo por estos ingenieros directamente o con asistencia del personal técnico, desconsiderando el hecho de que cada proceso de manufactura es un campo de conocimiento cuyo estudio demanda de conocimiento y dedicación específica y más ahora, cuando los desarrollos numéricos y computacionales permiten realizar modelos y simulaciones que facilitan el diseño y planeación de los procesos, pero que demandan de preparación cognitiva y científica específica a nivel de ingeniería. En la era de la automatización avanzada, cuando todas las áreas de la manufactura experimentan cambios revolucionarios, el ingeniero mecánico ya no puede satisfacer o copar el espectro amplio de una empresa manufacturera.

Son campos de la manufactura que no se cubren en programa alguno de pregrado en Colombia, a nivel de diseño de máquina y proceso, modelado, simulación y validación experimental: inyección de metales en moldes, procesos de deformación plástica, troquelado, forja multidimensional, estampado en frío y en caliente, electroerosión, soldadura por fricción, soldadura, grabado y corte laser, manufactura aditiva, temple laser, micromanufactura, control dimensional y de calidad en línea, todos ellos asistidos por computador, muchos con nivel de automatización a nivel de planta y con información compartida en la nube (red). Los ingenieros mecánicos que trabajan en los procesos de manufactura han sido formados por la empresa, se han autocapacitado, o han adquirido formación técnica en centros como el SENA.

La Ingeniería de Manufactura, como programa integra estrategias requeridas para mantener la capacidad tecnológica a la altura de los ritmos de competitividad requeridos por la competencia internacional, con sus componentes: *Hardware* HW (objetos tangibles); *Software* SW (conocimiento aplicado - registros); Organización OG (*Orgware* - Estructura organizacional e instituciones) y Competencias Humanas HM (*Humanware* HM - Competencias profesionales). El *Humanware*, es el verdadero disparador del cambio que enfrentamos, ya que la información tiene poco valor en sí misma y sólo se convierte en conocimiento cuando es procesada por el cerebro Humano.

El nuevo proyecto de educación en manufactura pretende servir de vehículo para el trabajo en los nuevos espacios del mundo productivo moderno e incluye los aspectos culturales, tecnológicos y operativos de las actividades de la manufactura productiva a la que está referido. Cada vez es más necesaria la producción intensiva de conocimientos científicos y tecnológicos y “la calidad de la



educación científica y tecnológica” se convierte cada vez más en la condición para el desarrollo y en la nueva ventaja comparativa entre países y regiones.

Cabe mencionar que el desarrollo de una sociedad está íntimamente ligado al grado de educación de sus individuos, donde la Universidad juega un papel importante en la formación profesional y pos-gradual y podría ir más lejos, buscando que el conocimiento y formación dado en las aulas, trascienda éstas y llegue a la comunidad interviniéndola positivamente. “La calidad de un sistema educativo no puede exceder la calidad de los maestros” y por esto se requiere también formar docentes estructurados científicamente en los saberes de la manufactura, *formación en know-how*.

Oportunidades de desempeño, potenciales y existentes, del ingeniero de manufactura

La existencia y calidad de las actividades innovadoras de un país depende, entre otros factores de la formación pertinente en las universidades. Sin un recurso humano altamente calificado, el país no podrá ser competitivo en aquellos sectores de alto valor agregado, sobre los cuales pretende apalancar el crecimiento de los próximos años. Para alcanzar una fuerza laboral con las cualificaciones que necesita el país, no sólo se requiere una cobertura de educación universal, sino que esta educación sea de alta calidad para todos. Las debilidades actuales del sistema productivo dan lugar a oportunidades de desempeño para los futuros ingenieros de manufactura.

Conclusiones

El estándar ISO 16100 es una herramienta que facilita la interoperabilidad de las herramientas computacionales que se han de utilizar en las diferentes actividades de la producción integrada por computador. En este trabajo se hizo la presentación del estándar, con el fin de que pueda ser tenido en cuenta como referencia y como herramienta por los integradores de sistemas de producción y también para evidenciar el vacío existente en la formación universitaria en ingeniería de manufactura o fabricación de bienes de capital.

Ha sido una motivación para la composición de este artículo generar opinión sobre la necesidad de crear un sistema de formación que fundamente la realidad tecnológica integrada por productos, máquinas, procesos y sistemas, requerida para la competitividad; un sistema que defina los fundamentos del know-how tecnológico aplicado a la obtención de bienes de capital, que se pueda modelar, simular, virtualizar, patentar y mercadear; un sistema de formación para la creación autóctona de “know-how”. Construir un concepto de realidad empresarial tecnológica exige un trabajo que vincule e integre los aparatos conceptuales y proposicionales de las ciencias básicas de la mecánica teórica, la teoría de mecanismos y máquinas, los procesos de manufactura, la mecatrónica y la ciencia de la medición y control, como mínimo, integrando además las nociones matemáticas y abstractas. Puede discutirse sobre teorías de la complejidad y otras tendencias, pero lo que apuntala todos los sistemas productivos competitivos modernos es la formación adquirida desde la escuela hasta los centros de educación superior. Una buena formación apuntala un buen sistema productivo, un buen sistema productivo permite un mejor bienestar y bajo éste se establecen unas mejores relaciones filosóficas, económicas, políticas, sociales, culturales y administrativas bajo las que se construyen mejores organizaciones empresariales.



La realidad actual obliga a la universidad a aportar propuestas que contribuyan a crear un tejido tecnológico y científico propicio para la formación y crecimiento del talento humano requerido para un crecimiento industrial, no a nivel de operarios, ni técnicos, sino a nivel de ingeniería. Siendo la manufactura la actividad que da mayores rendimientos a la economía de un país y la más intensiva en innovación; se hace necesario que el sistema estatal colombiano de universidades ofrezca formación de ingeniería de fabricación de bienes de capital con el compromiso de formar profesionales con estructura académica para diseñar procesos de fabricación.

Referencias

- [1] Mueller, G.; Seiraffi, M. and Beyerer, J. “Core Room of the Future: Utilizing Technical Innovations in the Area of Information Management”, Detroit, E.U., 2001 SAE Congress, SAE paper 2001-01-1036.
- [2] Estándar ISO 16100. “Industrial automation systems and integration – Manufacturing software capability profiling for interoperability”.
- [3] Verman, L. C.2 Standardization, a new discipline. New Delhi, Affiliated East-West Press, Nizamudin, 1973.
- [4] Website of the International Organization for Standardization at <http://www.iso.org>.
- [5] Website of the World Standards Services Network at <http://www.wssn.net>.
- [6] Bonilla, M. G. “Cambio Tecnológico y Crecimiento Económico Industrial. Impactos sobre la Estructura Ocupacional en la Industria Manufacturera Colombiana (1987 – 1997)”
- [7] Sistema Nacional de Competitividad, <http://www.snc.gov.co/>. Recuperado marzo 2017.
- [8] Departamento Nacional de Planeación, <http://www.dnp.gov.co>. Recuperado Junio 2017.



Transformación Tecnológica de un Vehículo de Combustion (MCI) a Vehículo Eléctrico (VE)

Technological Transformation of a Combustion Vehicle to an Electric Vehicle

Edgar Salazar^{1, γ}, Juan Felipe Arroyave^{1, γ}

1. Facultad de Tecnología, Tecnología Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira
γ. Autor corresponsal: edgarsalazar@utp.edu.co, jfa@utp.edu.co

Resumen

Colombia, al igual que otros países en desarrollo, viene incorporando en su parque automotor diversos vehículos eléctricos, motivado por una emergente política de incentivos, una preocupación por el medio ambiente y un alto costo del combustible. Sin embargo, este tipo de vehículos continúa siendo relativamente costosos. La transformación de vehículos térmicos (motor de combustión) a vehículos eléctricos se convierte en una opción interesante, debido a su bajo costo comparado con los vehículos eléctricos comerciales nuevos y el impacto ambiental positivo que representa. El presente trabajo describe una metodología para transformar un vehículo tradicional de combustión a eléctrico, mostrando el beneficio económico y el impacto en mitigación de gases efecto invernadero.

Palabras Clave: Vehículos eléctricos, transformación tecnológica, transporte sustentable

Abstract

Colombia, like other developing countries, has been incorporating various electric vehicles in its vehicle fleet, motivated by an emerging incentive policy, a concern for the environment and a high cost of fuel. However, this type of vehicle continues to be relatively expensive. The transformation of thermal vehicles (combustion engine) to electric vehicles becomes an interesting option, due to its low cost compared to new commercial electric vehicles and the positive environmental impact it represents. The present work describes a methodology to transform a traditional vehicle of combustion to electric, showing the economic benefit and the impact in greenhouse gas mitigation.

Key words: Electric vehicles, technological transformation, sustainable transport

Introducción

El transporte tradicional (con base en combustión) ha tenido, en los últimos años, un efecto cada vez mas nocivo para el medio ambiente y la salud humana. Recientemente, un estudio publicado [1] plantea que "por décadas, la polución y sus efectos sobre la salud humana, el medio ambiente y el planeta han sido despreciados por gobiernos y agendas de desarrollo internacional. Además, la polución es la principal causa de enfermedad y muerte en el mundo hoy, responsable por un estimado de 9 millones de muertes prematuras (Lancet magazine [1]). Esto representa el 16% de todas las muertes prematuras actualmente en el mundo. Esta publicación también informa que la polución mata a la población pobre y vulnerable (el 92 % de muertes corresponden a sectores sociales de estratos medios y bajos, siendo los niños los mas afectados). Además, los costos



debidos a la contaminación representan a la economía global 4,6 trillones de dólares por año, equivalente al 6,2% de la producción económica global [1].

El transporte, no es solo el principal responsable de los efectos sobre la salud humana, sino también la principal fuente de gases efecto invernadero. Estudios hechos en el Reino Unido por ejemplo, han mostrado que el transporte genera el 73 % de monóxido de carbono en el país (figura 1). De otro lado, el transporte se convierte en la principal fuente de componentes de la contaminación como material particulado (PM10) y Óxido de Nitrógeno.

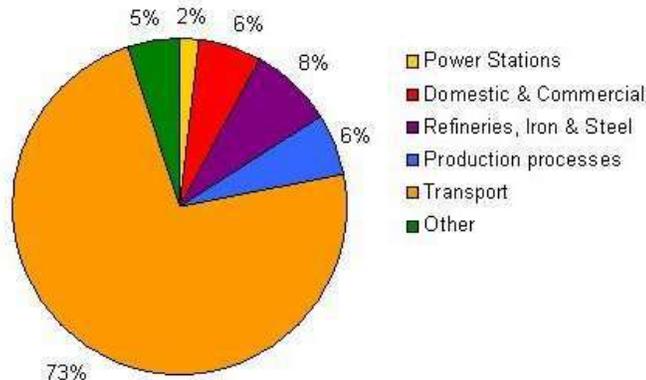


Figura 1: Sources of Carbon Monoxide Pollution in the UK (2001) [2].

Otros estudios [3] han mostrado de qué manera el crecimiento de las ciudades y por ende el número de vehículos y el sector industrial, han incrementado el problema de la contaminación y la salud pública. La movilidad eléctrica representa entonces una alternativa interesante para mitigar esta problemática, mas aún cuando implica el ahorro de costos por combustible, de crecimiento progresivo en países como Colombia. La transformación de vehículos de combustión a eléctricos han venido siendo implementados en diversos países de latinoamérica¹. El objetivo de este proyecto es realizar la conversión de un vehículo de combustión, tradicional en el contexto colombiano, a vehículo eléctrico, efectuando análisis del desempeño del sistema eléctrico construyendo las curvas par y potencia del motor.

Vehículos eléctricos

Los vehículos eléctricos han existido desde el siglo pasado, pero en gran parte, por los intereses económicos¹ no había sido posible un adecuado desarrollo tecnológico. Actualmente, las nuevas políticas de mitigación al cambio climático y las innovaciones tecnológicas han permitido un renacimiento de los vehículos eléctricos. Diversas compañías como Tesla han venido invirtiendo en investigación y desarrollo tecnológico que ha permitido expandir las características técnicas (autonomía, potencia, velocidad) y reducir el costo total, que han permitido equiparar y superar (en algunos aspectos) el desempeño de un vehículo de combustión.

En latinoamérica, los vehículos eléctricos aún tienen un alto costo para un usuario final, influenciado principalmente por el precio original de fábrica y los costos de importación implicados. Ejemplo de esto, el Nissan Leaf (modelo 24 kWh) cuesta 16607 euros en Japón, 29460 euros en España, pero en Colombia el costo asciende a 34300 Euros (equivalentes a \$ 120 000 000 COP). Para una persona que gana un salario mínimo actual (\$ 781 242 COP) equivalente a 228 euros es prácticamente imposible adquirir un vehículo de estas características. Por lo tanto,

¹ <https://www.autolibreelectrico.com/trabajos-realizados>



convertir un vehículo con motor de combustión a un vehículo eléctrico, es una opción interesante y viable.

Conversión del vehículo a eléctrico

Un vehículo Chevrolet Sprint (Suzuki Swift en Estado Unidos) ha sido seleccionado para realizar la conversión, debido a su bajo peso y su disponibilidad comercial.



Figura 2. Vehículo base de transformación

Las características técnicas del vehículo base de conversión:

Tara: 675 kg, Potencia: 46,8 kW, Relación Peso/potencia: 14,43. Cilindraje: 993 cm³.

La dinámica de tracción del vehículo ha sido analizada para establecer los requerimientos de potencia en función de los diferentes parámetros, incluyendo la pendiente, normalmente alta en la geografía latinoamericana.

La ecuación 1 [4] determina la potencia requerida para un vehículo involucrando las componentes pendiente, rodadura, efecto aerodinámico y aceleración.

$$\dot{W} = \left[W \sin \theta + C_r W \cos \theta + \frac{1}{2} \rho S K_a V^2 + m a \right] V \quad (1)$$

Donde W (peso), θ (pendiente de la carretera), C_r (coeficiente de rodadura), ρ (densidad del aire), S (sección transversal del vehículo), K_a (coeficiente aerodinámico), m (masa), a (aceleración), V (velocidad).

La figura 3 presenta el comportamiento de la potencia en función de velocidad del vehículo, tomando como valores:

$m = 1025$ kg (675 vehículo + 5 pasajeros de 70 kg) = 1025 kg, $C_r = 0,01$, $\rho = 1,2$ kg/m³, $K_a = 0,2$, $a = 0$ (velocidad constante), $S = 1$ m², $\theta = 10\%$ (pendiente alta).

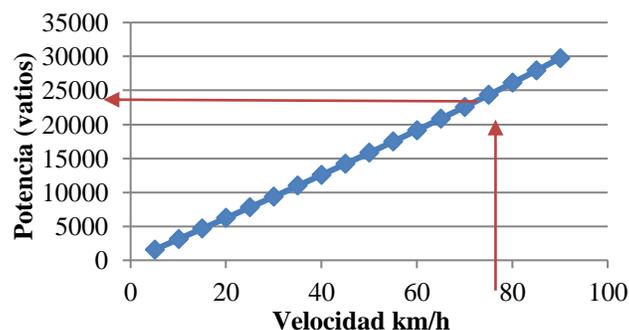


Figura 3: Potencia vs Velocidad del vehículo (pendiente 10%)



Tomando en consideración este resultado y el tipo de motor eléctrico adoptado comúnmente para los vehículos, se ha seleccionado un motor de 30 kW (40 HP), permitiendo la satisfacción de un amplio rango de sollicitaciones de carga. El vehículo eléctrico movido a velocidades menores a 60 km/h (en condiciones estándar) alcanzará niveles de autonomía superiores a los 300 km.

1.1. Pruebas del vehículo base (combustión)

Las pruebas de combustión son importantes para determinar cuánta polución emite el vehículo a la atmósfera. Para esto, se desarrollaron las pruebas dinámicas con base en el protocolo NEDC (New European driving Cycle) para evaluar consumo de combustible y emisiones contaminantes. La figura 4 presenta el ciclo empleado.

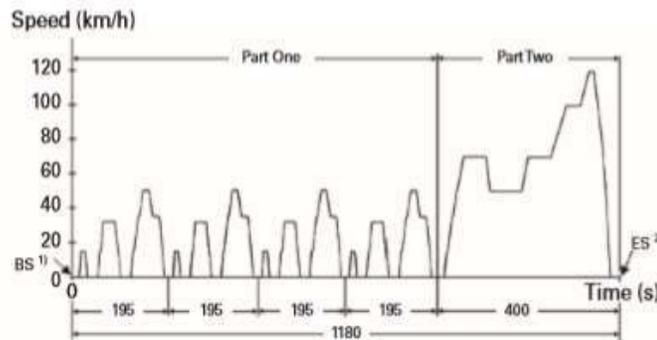


Figura 4: Ciclo de conducción: NEDC (New European Driving Cycle)

Durante las pruebas, el consumo de combustible promedio fue de 57,78 km/galón (6,54 L/100 km). Los gases de combustión obtenidos fueron CO: 1,808 g/km, THC + NOx: 0,652 g/km.

Los valores mostraron que se sobrepasan los límites internacionales establecidos, los cuales para este tipo de vehículos y de acuerdo a los estándares [5] (Euro 4) son: CO: 1,0 g/km y HC + NOx: 0,3 g/km.

En Colombia, los vehículos son evaluados con base en el protocolo Euro 2 (resolución 910 de 2008), que establece límites como CO: 2,20 g/km y HC+NOx: 0,50 g/km. Teniendo en cuenta los resultados el vehículo seleccionado es altamente propicio para la conversión.

1.2. Sistema (kit) eléctrico

La conversión tecnológica de este vehículo demanda un kit de 40 HP (30 kW) a 72 VAC, con los siguientes componentes (Figura 5):

- Controlador AC de 72 V 400 A.
- Convertidor DC-DC 12 Vdc – 72 Vdc
- Cargador CH4100 72 V 25 A.
- Acelerador Electrónico
- Motor AC HPQ7.5YBE-72
- Bomba de vacío para freno, 12 V.
- Batería de Litio con carcasa y control BMS

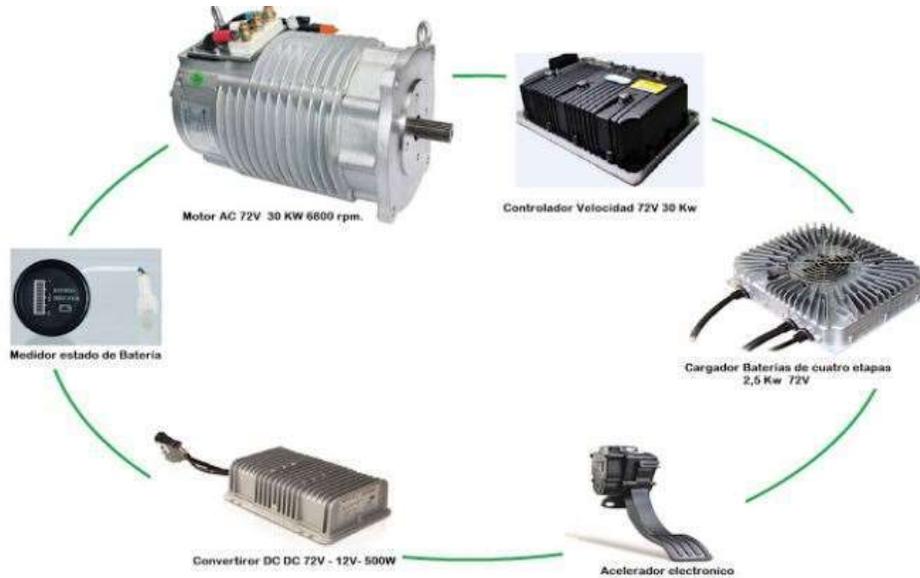


Figura 5: Componentes del sistema eléctrico

Pruebas preliminares del kit eléctrico

Antes de la instalación del sistema, se efectuaron las pruebas del motor (sin carga) para verificar que el estado de los componentes y el funcionamiento del sistema fuera adecuado. Se midió la potencia del motor en vacío para establecer la referencia para las mediciones futuras con carga. La figura 6 presenta un esquema de las conexiones eléctricas del sistema.

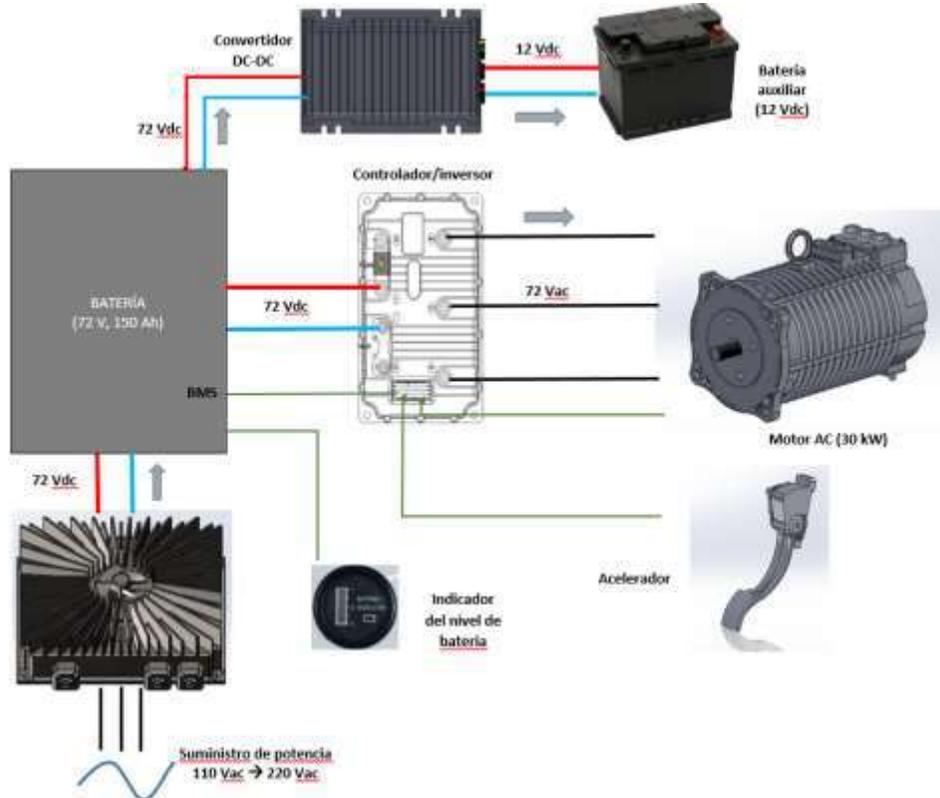


Figura 6: Esquema unifilar de conexiones



La batería principal debe ser conectada a la batería auxiliar de 12 VDC (puede usarse del vehículo original) para cargarla continuamente, reemplazando la función del alternador. La batería emplea un BMS (Battery Management System) que requiere ser conectado al controlador para lograr retroalimentación del sistema.

La corriente eléctrica demandada por el motor en las pruebas sin carga registró picos de 40 A (72 Vac) representando un consumo de 2880 W, con una velocidad de rotación del motor de 3000 RPM. Las pruebas iniciales permitieron identificar conectores, cables, protecciones necesarias, rango de trabajo del acelerador. La figura 7 muestra una imagen del sistema ensamblado.



Figura 7: Ensamble de pruebas (en vacío) iniciales del motor

Se realizaron las pruebas de carga de la batería conectando a red eléctrica de 120 VAC (red local en Colombia), presentando consumos de 14 A (1700 W). En estas pruebas iniciales, la batería principal está prácticamente cargada, suponiendo demandas mayores cuando esté descargada.

1.3. Etapas del proceso de conversión

a) Desensamble del motor de combustión

Inicialmente, el motor de combustión es removido del vehículo de manera cuidadosa, para mantener su estado de funcionamiento. Para ello, se liberan tornillos de acople, se desconectan filtros de aire y de combustible, entrada de aire, tuberías, distribuidor, carburador, radiador y correa del ventilador, tubo de escape, tanque de combustible y otros componentes de acople. El motor es retirado solo hasta que esté totalmente desensamblado. Para retirarlo se extrae en conjunto con la caja de velocidades, la cual es desensamblada fuera del vehículo. La figura 8 presenta algunas imágenes.



Figura 8: Imágenes del proceso de desmontaje del motor de combustión (de izquierda a derecha: motor ensamblado, retirada del motor, habitáculo sin motor)



b) Ensamble motor eléctrico-caja de velocidad

Inicialmente, se hace necesario el diseño y fabricación del acople entre motor eléctrico y caja de velocidad. En esta conversión no se usará embrague, ya que el rango del acelerador permite satisfacer en condiciones estándar un amplio margen de demanda de potencia. Se empleará entonces de manera permanente la 3ª marcha de la caja de velocidad. Esto genera condiciones similares a un vehículo automático, donde solo requiere aplicar freno y acelerador. No obstante, en condiciones de alto par de torsión (arranques en ascenso por ejemplo) se podrá ajustar a una marcha diferente de mayor par. Para garantizar la concentricidad entre el eje del motor y el eje de la caja de velocidad es necesario fabricar un acople y una placa de centrado. La figura 9 muestra las partes diseñadas y una imagen de la placa ensamblada al motor.

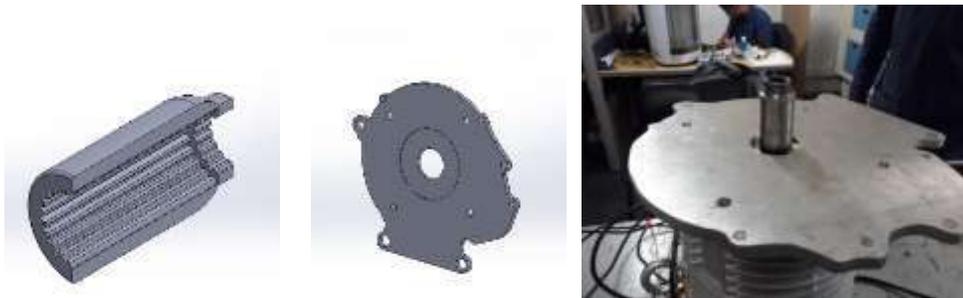


Figura 9: Acople y placa de centrado

El agujero estriado del disco del embrague ha sido aprovechado para acoplar los dos ejes (motor y caja). Esta parte del acople se une a un agujero estriado que ajustará en el eje del motor eléctrico. Este acople es diseñado para garantizar el ajuste necesario sin pérdida de potencia por desalineación de los componentes. La placa fabricada de aluminio de 10 mm no incrementa un peso considerable al sistema, y cuenta con un agujero para centrar y ajustar el motor eléctrico. El borde de la placa se define con base en la cara frontal plana de la caja de velocidades, sirviendo de guía las perforaciones para tornillos sujeción.

Se efectuaron pruebas de movimiento y medición de potencia con motor y caja de velocidades acoplados. La corriente incrementó (tal como se tenía previsto) solo el 10%, debido a la fricción normal entre ruedas dentadas de caja, comprobando un correcto ajuste y funcionalidad del acople. La figura 10 presenta motor y caja acoplados y el montaje en habitáculo del vehículo.



Figura 10: Ensamble y montaje de motor eléctrico y caja acoplados



c) Montaje de motor-caja y componentes

El ensamble caja-motor es acoplado en vehículo, empleando los soportes del motor de combustión original. Para la proyección de montaje, teniendo en cuenta dimensiones y optimización del sistema, se emplearon herramientas de modelado 3D (figura 11). La batería y el cargador son ubicados en el baúl del vehículo, teniendo en cuenta a las dimensiones y pesos y la cercanía del conector de carga, previsto en el mismo lugar de la entrada (original) de combustible. La figura 12 presenta imágenes de ubicación de los componentes.



Figura 11: Proyección de montaje de componentes con modelo de vehículo a escala



Figura 12: Ubicación de batería de litio y demás componentes

La caja de conexiones eléctricas (figura 11) se ha empleado para implementar protecciones de sobrecorriente y tensión e incorporar un relé (o relevador) para suministrar acceso de señales al sistema con la activación de la señal del interruptor principal del vehículo. La figura 13 presenta



un esquema del circuito empleado, manteniendo la ubicación de componentes en el vehículo (vista superior).

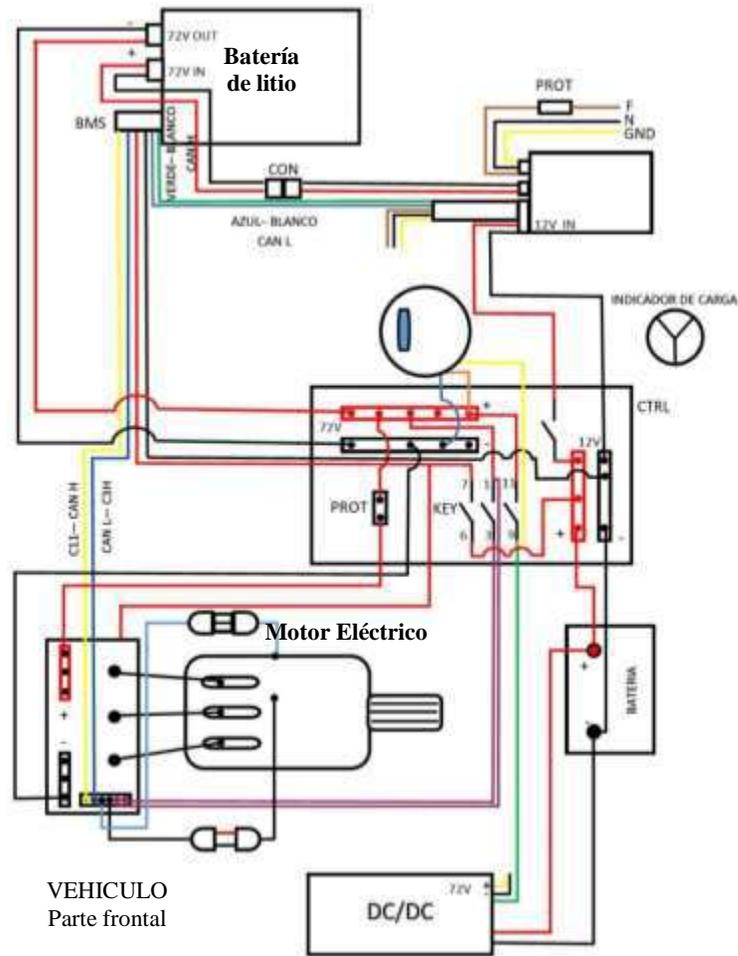


Figura 13: Esquema del circuito eléctrico

1.4. Balance de masas

Se efectuó la comparación total de masa del vehículo antes (combustión) y después de transformación (eléctrico). Se tomaron pesos de los diferentes componentes (figura 14) en cada uno de los sistemas, la tabla 1 presenta los resultados.

Tabla 1: Comparación del peso de componentes

Sistema eléctrico		Motor a combustión	
Componente	masa (kg)	Componente	masa (kg)
Motor eléctrico	40	Motor de Combustión	150
Batería de Litio	90	Tanque de combustible (lleno)	30
Controlador	6	Radiador	5
Cargador	5	Tubo de escape	6
DC-DC	1	Tubería y filtros	5
Convertidor	1		
Total	142	Total	196 kg



Figura 14: Medición de la masa del motor eléctrico

La transformación del vehículo en eléctrico representa una reducción del peso de alrededor del 30 %, permitiendo que la potencia demandada sea menor para las mismas condiciones de carretera.

Pruebas experimentales

Se realizó un análisis comparativo del comportamiento del motor de combustión y motor eléctrico bajo condiciones de pruebas similares (laboratorio de pruebas dinámicas de la Universidad Tecnológica de Pereira) antes y después de transformación. Se realizaron pruebas dinanométricas para encontrar las curvas potencia y par de torsión contra velocidad de rotación del motor (figura 15).

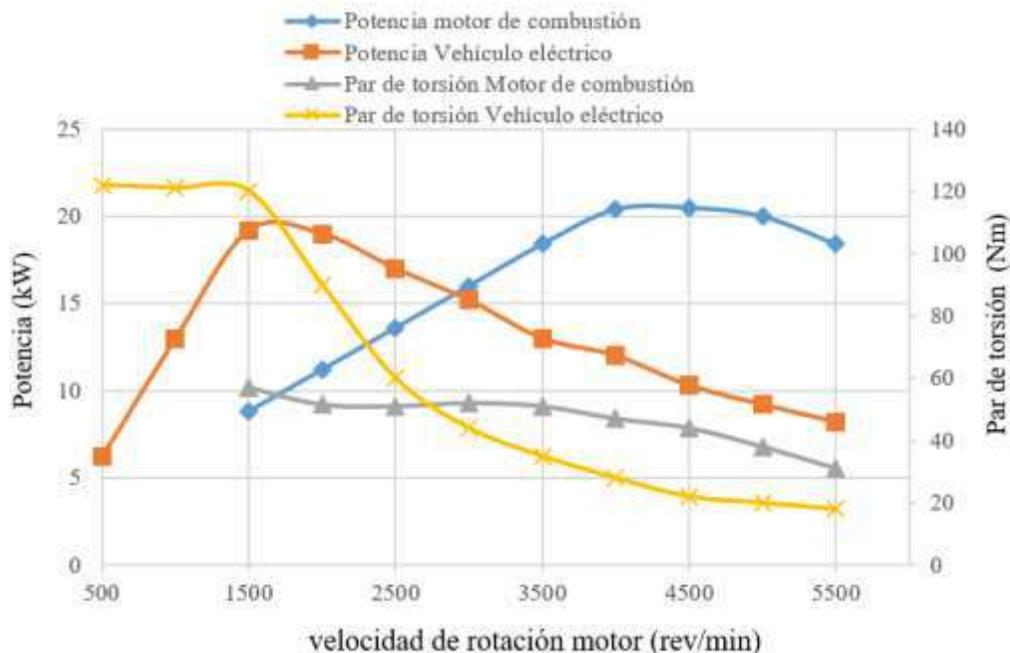


Figura 15: Comportamiento de par de torsión y potencia del vehículo con motor de combustión y motor eléctrico



Es notable que el vehículo eléctrico presenta mejores características de par de torsión y potencia a bajas revoluciones. Esta condición permite al motor eléctrico satisfacer altos requerimientos de carga, por ejemplo cuando el vehículo comienza a moverse, o para arranques en pendiente positivas. Para altas revoluciones, el motor de combustión presenta mejores condiciones de par de torsión y potencia, pero con altos consumos de combustible.

Pruebas de campo (carretera), bajo diferentes solicitaciones de carga (pendientes, condiciones de carretera y aceleraciones) serán necesarias para determinar la respuesta real del motor eléctrico con todo el sistema electrónico adaptado. Así también, la condición de motor será analizado en pendientes negativas o aprovechando la inercia del vehículo en movimiento. Actualmente se desarrollan estas pruebas, así como la determinación de la autonomía de batería bajo condiciones de manejo estándar (velocidad constante, terreno plano) y otras solicitaciones de carga (pendiente, aceleraciones y condiciones de carretera).

Conclusiones

Actualmente el vehículo eléctrico está bajo pruebas. Pruebas experimentales han mostrado un buen comportamiento de la potencia bajo algunas condiciones de carga, validando el modelo planteado (1). En terreno plano (pendiente 0) el vehículo ha alcanzado velocidades de 60 km/h con una potencia de 20 kW (velocidad constante). La batería está siendo probada bajo diferentes condiciones de carga. Las pruebas realizadas han mostrado una autonomía de 300 km

Pruebas llevadas a cabo en el vehículo de combustión (antes de conversión) mostraron que el consumo de combustible fue de 6,54 L por cada 100 km, mostrando niveles de contaminación altos (CO: 1,808 g/km, THC + NOx: 0,652 g/km), sobrepasando los límites internacionales admitidos, generando un alto impacto en la huella de carbono.

Análisis comparativos de masas mostraron que la transformación de un vehículo de combustión a eléctrico puede tener una reducción de la masa total casi del 30% y a su vez la carga demandada, incrementando las prestaciones del motor en potencia.

El factor económico representa una importante razón para realizar este tipo de conversiones, principalmente en el contexto latinoamericano. En Colombia, por ejemplo, el costo total del sistema eléctrico oscila alrededor de 5 000 USD (14 220 000 COP, al cambio hoy). Un vehículo eléctrico nuevo cuesta cerca 100 000 000 COP (35 000 USD), siendo realmente costoso para una persona común (el salario mínimo mensual se encuentra hoy en 781 242 COP - 274 USD).

El costo del combustible actualmente está cerca de \$ 9000 COP/galón = \$2400/L. El costo del kWh es aproximadamente \$400COP/kWh. Con motor de combustión, el consumo del vehículo por cada 100 km era de 6,54 L de combustible que cuesta **\$15700**. La carga total de batería es 150 Ah - 72 V (10800 Wh) con 300 km de autonomía. Por lo tanto, 100 km representan un consumo de 3600 Wh que cuesta **\$1440**. En síntesis, con un vehículo eléctrico, cada 100 km representan ahorros de \$14260, además del impacto en la mitigación de los gases efecto invernadero, equivalentes a dejar de enviar a la atmósfera 180 g de CO por cada 100 km de recorrido.



Referencias

- [1] The Lancet, magazine. The Lancet Commission on pollution and health. Published: October 19, <http://www.thelancet.com/commissions/pollution-and-health>. <https://youtu.be/9jOpNF2uc2M> (2017).
- [2] Air Pollution, “Air Pollution Emissions in the UK, Vehicle emissions”. <http://www.air-quality.org.uk/08.php>
- [3] The guardian magazine. “Air pollution rising at an 'alarming rate' in world's cities”. <https://www.theguardian.com/environment/2016/may/12/air-pollution-rising-at-an-alarming-rate-in-worlds-cities>, <http://www.ucsusa.org/clean-vehicles/car-emissions-and-global-warming#.WfD6wvmCzIV>.
- [4] Gillespie, Thomas D. “Fundamentals of vehicle Dynamics”. Society of Automotive Engineers, Inc. USA (2016).
- [5] Delphi Innovation for the real world. Worldwide Emissions Standards (Passenger Cars and Light Duty), <https://d2ou7ivda5raf2.cloudfront.net/sites/default/files/inline-files/2017%202018%20Worldwide%20Emissions%20Standards%20Passenger%20Cars%20Light%20Duty.pdf> (2017-2018).
- [6] Pahl&Beitz. “Engineering Design”. 3rd ed. Springer, London (2007).
- [7] Cross, Nigel. Engineering design methods. Strategies for product design. 4 ed. John Wiley & Son, Londres (2008).
- [8] Jazar, R. N. “Vehicle Dynamics, Theory and Application”. Melbourne Australia, Springer. USA (2008).



Herramientas para Asistir el Proceso de Diseño para el Sector Metalmeccánico

Tools for Design Process Applied to Metalmechanic Cluster

Ing. Juan David Carvajal Corrales^{1,γ}, Phd. Junes Abdul Villarraga Ossa¹

1. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
γ. Autor correspondal: juand.carvajal@udea.edu.co

Resumen

Los procesos de diseño, aunque son considerados importantes al interior de las organizaciones, son llevados a cabo sin demasiado rigor, la mayoría de las veces por desconocimiento de las técnicas y herramientas disponibles para apoyar cada una de las etapas, situación que genera problemas en los resultados esperados a la hora de diseñar. Estos problemas suelen ser: demoras en la salida del producto, sobrecostos de desarrollo, pérdida de competitividad y diseños que apenas logran cumplir las necesidades básicas a cubrir. Debido a estos problemas se propone entregar a las empresas del sector metalmeccánico algunas de las herramientas disponibles, que sean de fácil aprendizaje y que requieran una inversión baja o potencialmente nula, para su implementación, permitiendo de esta manera mayor competitividad y eficiencia en los procesos de diseño, entregando así, productos que cumplan a cabalidad las necesidades principales y comiencen a tener valor agregado, diferenciador e innovador.

En este trabajo se presenta el estado del arte y el análisis de las herramientas: Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF), el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y Teoría de Resolución Inventiva de Problemas (TRIZ), y se pretende con ellas facilitar las etapas de diseño conceptual, diseño de detalle y la selección de alternativas de forma estructurada y objetiva.

Palabras clave: Diseño, Herramientas, Metalmeccánica, AMEF, TRIZ, AHP

Abstract

Design processes, although they are considered important within organizations, are carried out without any rigor, most of the time due to ignorance of the techniques and tools available to support each of the stages, a situation that generates problems in the expected results when designing. These problems are usually: delays in the output of the product, cost overruns in the development, loss of competitiveness and designs that barely manage to meet the basic needs to be covered. Due to these problems it is proposed to give to the companies of the metalworking sector some of the tools available, that are easy to learn and that require a low or potentially no investment, for its implementation, thus allowing greater competitiveness and efficiency in the design processes, thus delivering products that fully meet the main needs and begin to have added differentiator and innovator value.

In this work are presented the state of art and the analysis of the next tools: Failure Mode and Effect Analysis (FMEA), The Analysis Hierarchical Process (AHP) and the Theory of Inventive Problem Resolution (TRIZ), the intention is to facilitate the stages of conceptual design, detail design and the selection of alternatives in a structured and objective way.

Keywords: Design, Tools, Metalmechanic, AMEF, TRIZ, AHP



Introducción

Es muy común que los problemas de diseño sean resueltos de manera intuitiva, buscando removerlos del camino de la forma más rápida posible. Esto incentiva la no valoración de los conceptos de solución, porque dicha valoración da la impresión de consumir demasiado tiempo y lo que se quiere es continuar con el desarrollo del diseño a la mayor brevedad.

Lo que no se visualiza, es que la planeación del diseño en estados tempranos del desarrollo es una inversión, ya que conforme avance el proceso de desarrollo más costoso puede ser intervenir el diseño [1], no solo se deben calcular los costos directos como horas de diseñador o aumento en materiales, mecanizado u otros, deben contemplarse los costos indirectos y ocultos como pueden ser perder la ventaja respecto a la competencia y que esta saque un producto exitoso primero, los costos asociados al incumplimiento de tiempos acordados, costos asociados a pérdida de confianza de los clientes y más grave aún, defectos que afecten la funcionalidad o incluso la seguridad.

Como la intención es obtener resultados repetibles y de forma sistemática, se pueden ver estudios como el de King y Sivalagonathan [2], en dicho estudio se muestran varias técnicas de generación de conceptos (CGM: Concept Generation Methods) como son *brainstorming*, *brainwriting*, *mind-mapping*, búsqueda en bases de datos, *sketch*. en estos estados es más importante la cantidad que la calidad, ya que posteriormente se pueden crear sinergias entre conceptos. Luego se mencionan las técnicas de selección de conceptos (CSM) como son la teoría de utilidad de Path y Beitz, el análisis jerárquico de proceso (AHP), el método de Pugh, la matriz QFD y los métodos difusos. Por último, se propone una metodología flexible de selección de conceptos que busca generar un diseño flexible que puede terminar en una variedad de productos finales. King menciona que 60%-80% del costo de un producto queda definido por el concepto de diseño, por lo que se refuerza la idea de invertir bastantes esfuerzos en las etapas de diseño.

Por otra parte Julian Booker *et al* [3] hace una revisión de la generación, clasificación y valoración de los diseños conceptuales, utilizando diferentes métodos como son el QFD, la matriz de selección de Pugh, el AHP, entre otros y aplicando estos al diseño de sistemas electromecánicos, mostrando así, la aplicabilidad y efectividad de estos a la hora definir el material de entrada para el diseño de detalle. Los criterios de calificación deben estar atados a un valor de importancia y la forma de realizarlo esta particularmente bien descrita en este trabajo, teniendo en cuenta factores como la subjetividad y la cantidad de criterios, necesarios para no robustecer más de la cuenta los análisis.

En vista de lo anterior, se comienza a introducir en el quehacer ingenieril prácticas más sistémicas de diseño, buscando resultados repetibles y más que aceptables. Las ensambladoras automotrices son un claro ejemplo del uso de estas herramientas. Buscando reducir los problemas de calidad en toda la cadena de desarrollo, recurren a herramientas diseñadas para atender cada uno de los aspectos a considerar como son el control de la calidad, el aseguramiento metrológico, la eficiencia de desarrollo de producto y proceso, entre otros, dentro de todas estas resalta para el caso de diseño el AMEF [4] usado tanto para diseño de producto, como para el diseño de proceso. A pesar de ser el AMEF una herramienta muy arraigada en el sector autopartista, ha logrado hacerse campo en el diseño por fuera de este sector.

El uso de la herramienta QFD ha sido adoptado también con éxito a la hora de traducir todos esos deseos y requerimientos que expresan los clientes con la intención de obtener el resultado que los haga sentir a gusto, que llene todas sus expectativas, que supere el *must be*. La ventaja de la



herramienta es la aplicación en varias de las etapas del desarrollo de producto (levantamiento de necesidades, diseño conceptual, diseño de detalle, manufactura, comercialización). Esta adopción y versatilidad se ven reflejadas en la gran cantidad de áreas de aplicación [5], desde mejoras en el desempeño hasta la industria hospitalaria, pasando por proyectos de investigación y desarrollo, selección óptima de requerimientos de diseño, diseño de productos, entre otros.

La metodología TRIZ es ampliamente conocida por su impacto a la hora de afrontar rediseños y eliminar contradicciones en la funcionalidad de un artefacto, siendo una metodología reconocida en el campo de la innovación, no solo para productos, también para procesos y sistemas organizacionales. El uso de TRIZ es capaz de abordar diseños y rediseños tan variados como es el caso de productos de consumo (lavadoras, carcasas para laptop, aspiradoras), Automoción (balastos para locomotoras, palancas para freno de mano), entre otros, mostrando así mismo su conjunción con técnicas como AHP, QFD, AMEF, Diseño axiomático, entre otros [6].

Mayda y Borklu [7] desarrollan una técnica innovadora para el diseño conceptual utilizando TRIZ, QFD y el diseño sistemático de Pahl and Beitz's. En esta técnica se puede observar el uso de TRIZ como localizador de contradicciones, generador de soluciones y mejorador de dichas soluciones.

Como se planteó en párrafos anteriores, el potencial de las herramientas que pueden ser usadas en los procesos de diseño al interior de las empresas es de un alcance bastante importante, permitiendo la potenciación de los resultados del diseño, así como mejorando la competitividad frente a mercados internacionales que exigen tanto tiempos de desarrollo cortos como calidad excepcional.

La necesidad de implementar este conocimiento en las empresas en lo posible desde la más pequeña de la cadena productiva busca generar la cultura de la excelencia en el diseño, replicando así los resultados y mejoras a todo lo largo de la cadena, repercutiendo así en un impulso en la calidad de los profesionales, de las empresas y de los sectores participantes.

El aporte de este trabajo es describir diferentes herramientas de diseño que puedan ser fácilmente implementadas en el sector metalmecánico con el fin de potenciar las capacidades de diseño y hacerlas más eficientes de cara a la competitividad y excelencia que el mercado requiere, además, permitiendo que estas puedan apuntar a mayores cuotas de mercado por medio de la eficiencia en sus procesos de diseño, liberando así recurso que puede ser usados en otros labores estratégicas en pro del crecimiento de las empresas y el quehacer industrial.

Marco Teórico

Las empresas pymes requieren de herramientas de fácil aplicación, con curvas de aprendizaje muy simples que les permitan obtener resultados acordes al tamaño del proyecto, adicionalmente, deben ser herramientas que no requieran o por lo menos que sean mínimas inversiones, esto debido a que en el mercado se encuentran disponibles varios softwares que automatizan los procesos de AMEF, TRIZ, QFD, DFM&A, entre otros. Dichos softwares tienen costos muy elevados que las empresas Pymes no se puede permitir.

Debemos apoyarnos inicialmente en herramientas tan comunes como las hojas de cálculo que se encuentran disponibles en cualquier empresa. Por otro lado, muchas herramientas requieren solamente de uso de formatos y el conocimiento de cómo utilizarlos.

Para mostrar la posibilidad de uso de las herramientas de diseño, se escogieron 3 herramientas de fácil aplicación y gran impacto en los procesos de diseño, como son: AMEF, TRIZ y AHP. Se escogieron estas por su relativa facilidad y el apoyo que pueden prestar al proceso de diseño en



etapas como son el diseño conceptual, diseño de detalle y la selección de opciones. En la tabla 1 se observa el objetivo y dentro de que etapa del proceso de diseño es usada cada herramienta

Tabla 1. Comparativo de las etapas ilustradas

	ETAPAS INVOLUCRADAS	OBJETIVO
AMEF	Diseño Conceptual, Diseño de detalle	Prevenir problemas de diseño
TRIZ	Diseño de detalle	Resolver contradicciones de diseño
AHP	Selección de alternativas	Toma de decisiones

A continuación, se ilustrará el objetivo, funcionamiento y facilidad de cada herramienta.

Análisis del modo y efecto de falla (AMEF)

El AMEF [4][8] es un herramienta creada por el ejército de los Estados Unidos en la década de los 40's buscando reducir el fallo en sus municiones, dicha herramienta buscaba aumentar la confiabilidad de estas. Es un procedimiento que busca identificar los posibles fallos en un producto, proceso o sistema. Además, permite identificar y clasificar los efectos, causas y forma de identificación para así evitar o reducir su aparición en la vida útil de un diseño.

Esta herramienta es ampliamente utilizada en los procesos de desarrollo de producto, pudiendo aparecer tanto en la planeación, diseño y desarrollo del producto y también en la etapa de desarrollo del proceso, permitiendo así la existencia de tres tipos de AMEF: de planeación, de diseño de producto y de diseño de proceso.

Para este caso ahondaremos en el AMEF de diseño, el cual permite:

- Identificar posibles fallos en el diseño.
- Conocer en detalle el producto a diseñar.
- Identificar los efectos que pueden generar un fallo en el funcionamiento del producto a diseñar.
- Evaluar el nivel de criticidad de los efectos.
- Identificar las posibles causas que desemboquen en un fallo.
- Establecer niveles de confiabilidad para la detección de fallas.
- Evaluar mediante indicadores específicos la relación entre: gravedad, ocurrencia y detectabilidad.
- Documentar los planes de acción para minimizar los riesgos.
- Identificar oportunidades de mejora.
- Generar *Know-how* al interior de la empresa.

Para explicar el funcionamiento del AMEF se deben clarificar tres conceptos claves para su ejecución: *Severidad, Ocurrencia Y Detección*.

Severidad

Es el valor asociado al más serio efecto para un modo de falla dado, Esto quiere decir, que tan graves es que suceda un tipo de fallo.

La calificación de la severidad se realiza de 1 a 10 donde 10 es el fallo más severo el cual interrumpe la funcionalidad y 1 es donde no se alcanza a detectar el fallo y no se hace visible durante la operación.

Ocurrencia

Es la probabilidad de que una causa/mecanismo específico ocurra, resultando en un modo de falla dentro de la vida del diseño.



La clasificación de esta se hace de 1 a 10, siendo 1 las fallas que son eliminadas mediante controles en la producción, 9 las fallas inevitables con el diseño propuesto y 10 cuando el diseño no tiene historia o antecedentes para determinar qué tan fácil es que ocurra el fallo.

DetECCIÓN

Es el rango asociado con el mejor control de detección para un fallo determinado, estos valores se pueden evaluar de 1 a 10 siendo 1 las fallas casi imposibles de ocurrir debido a los controles, materiales conocidos o diseños a prueba de fallos y 10 cuando es casi imposible de detectar o no se analiza el medio de falla.

Después de evaluar las variables anteriores se procede a calcular el **Número de Prioridad en Riesgos (NPR)**, definido de la siguiente manera:

$$NPR = Severidad(S) \times Ocurrencia(O) \times Deteccion(D) \quad (1)$$

Este número es utilizado como un indicativo de la forma en que se deben priorizar las modificaciones para blindar el diseño sobre posibles fallos.

Como todo proceso, depende del rigor con que se apliquen las acciones tanto de construcción como de ejecución.

Llevando este método a la práctica, se recurre a una plantilla similar a la mostrada en la tabla 2, donde se condensa la información del elemento, la forma de falla y los efectos que este genera. Además se condensan los valores de severidad, ocurrencia y detección identificados y se calcula el NPR para observar si producto o elemento es susceptible de un rediseño para disminuir el valor del NPR y las acciones que se llevaran a cabo para cumplirlo.

Tabla 2. Plantilla propuesta para implementación de AMEF (Construcción propia)

AMEF							
ELEMENTO/FUNCION	MODO DE FALLO	EFEECTO	S	O	D	NPR	ACCIONES PROPUESTAS
Describir el elemento	Describir el modo en que puede fallar	Describir que puede provocar el fallo del elemento	1 a 10	1 a 10	1 a 10	1 a 1000	Describir si el fallo tiene un NPR significativo cuáles serán las acciones para disminuir este valor, rediseños del elemento.

En resumen, el AMEF nos permite clasificar según su nivel de importancia los posibles modos de falla del producto o componente, permitiendo así enfocar los procesos de corrección de diseño, evitando así, problemas posteriores no identificados que puedan poner en riesgo la salida al mercado de dicho producto o peor aún, problemas de cara al cliente, derrumbando la confianza sobre el producto. Recordemos que los rediseños mientras más avanzado se encuentre el desarrollo del producto más costoso se hace cualquier rediseño.

Teoría de resolución inventiva de problemas (TRIZ)

También conocido como resolución inventiva de problemas, se encuentra basada en la hipótesis que existen principios de invención que están por encima de un campo de aplicación específico, es decir, es posible encontrar solución a problemas de un campo determinado, en otro campo aparentemente diferente. Se encuentra sustentada en el concepto que el diseño es un concepto holístico.



Fue creada en la década de los 50 en la antigua URSS por el ingeniero ruso Genrich S. Altshuller [9], que después de analizar un millón y medio de patentes encontró que a pesar de que los inventos solucionaban problemas en campos que aparentemente no se relacionaban, de las soluciones obtenidas se podían extraer un conjunto reducido de ideas o principios de invención.

El método TRIZ está concebido inicialmente para problemas del tipo tecnológico, donde una solución de un problema o necesidad interviniendo un parámetro genera una contradicción [10] con otro parámetro existente que también es importante para sistema, por ejemplo, si debo aumentar la resistencia de un objeto una posible solución en volverlo más robusto, pero esto a su vez aumenta el peso del sistema, el cual es necesario mantener al mínimo. Esto se considera una contradicción.

Al utilizar esta metodología, los problemas son clasificados en dos grandes grupos: los de solución conocida y los de solución desconocida.

Clasificación de las soluciones:

Nivel 1 – Elemental (Sin invención): problemas rutinarios con soluciones conocidas dentro del campo de aplicación. No conllevan ninguna invención y son fáciles de resolver 32% .

Nivel 2 – Mejora: Mejoras menores a sistemas conocidos, con soluciones conocidas en la industria. 45%.

Nivel 3 – Invención dentro del paradigma: Mejoras fundamentales a sistemas existentes, por métodos conocidos por fuera de la industria. 18%.

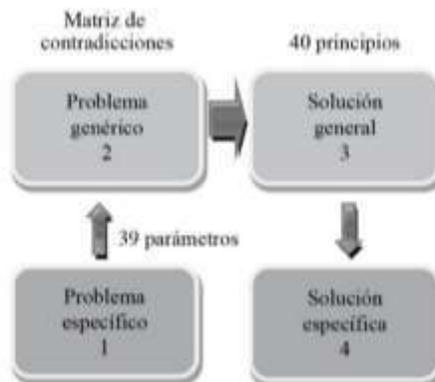
Nivel 4 – Invención fuera del paradigma: Una generación nueva que usa un nuevo principio de funcionamiento para realizar sus funciones primarias. Se apoyó más en la ciencia que en la tecnología. 4%.

Nivel 5 – Descubrimiento: descubrimiento raro científico o invención pionera. 1% .

El método TRIZ busca aumentar la idealidad de un sistema, es decir, aumentar los efectos benéficos sobre el sistema sin aumentar los efectos perjudiciales. Estos efectos perjudiciales pueden ser mayor consumo de energía, mayor costo de fabricación, contaminación, etc.

Cuando el aumento de un efecto benéfico trae el aumento de un efecto perjudicial es lo que anteriormente se nombró contradicción. Por lo que se pretende aumentar los efectos benéficos del sistema controlando o disminuyendo los perjudiciales.

El proceso general de TRIZ sigue el patrón mostrado en la figura 1.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1. Esquema de solución de problemas usando TRIZ



A grandes rasgos debemos comenzar por definir bien nuestro problema de diseño, luego debemos volverlo genérico utilizando los 39 parámetros definidos por Altshuller [9] ilustrados en la tabla 3, después de tener identificados en función de estos parámetros los que se encuentran en conflicto se recurre a la matriz de contradicciones para encontrar cual(es) de los 40 principios de soluciones [9] ilustrados en la tabla 4 se aplican a nuestro escenario. Estos principios muestran formas genéricas de solucionar las contradicciones, por ejemplo, cambiando la forma del objeto, separando en dos o más, fusionándolos, cambiando el material, etc. Todos los principios no son siempre aplicables a nuestro problema debido a lo genérico de las soluciones, en esta situación influye la capacidad técnica de los participantes a la hora de filtrar las soluciones aplicables al contexto del problema. Al final se particulariza la solución seleccionado de nuevo al campo de aplicación del diseño.

Tabla 3. Parámetros técnicos para el uso de TRIZ (Adaptado)

Peso del objeto móvil	Peso del objeto inmóvil
Longitud del objeto móvil	Longitud del objeto inmóvil
Área del objeto móvil	Área del objeto inmóvil
Volumen del objeto móvil	Volumen del objeto inmóvil
Velocidad	Fuerza
Tensión, presión	Forma
Estabilidad del objeto	Fortaleza
Durabilidad del objeto móvil	Durabilidad del objeto inmóvil.
Temperatura	Brillo
Gasto energético de objeto móvil	
Gasto energético de objeto inmóvil	Potencia
Perdida de energía	Perdida de sustancia
Perdida de información	Pérdida de tiempo
Cantidad de sustancia	Confiabilidad
Precisión de medida	Precisión de fabricación
Factores nocivos actuando sobre el objeto	Efectos laterales perjudiciales
Manufacturabilidad	Conveniencia de uso
Reparabilidad	Adaptabilidad
Complejidad del dispositivo	Complejidad del control
Nivel de automatización	Productividad

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Principios inventivos para la solución de conflictos en TRIZ (Adaptado)

1. Segmentación (fragmentación)	2. Separación (hablar fuera, extraer)
3. Calidad local	4. Cambio de simetría (asimetría)
5. Combinación (consolidación)	6. Multifuncionalidad (consolidación)
7. “La muñeca anidada” (la encapsulada “Matrushka”)	8. Compensación de peso (anti-peso, contrapeso)
9. Neutralización preliminar (anti-acción preliminar, pre-contracción)	10. Acción preliminar (acción prioritaria, hacerlo en forma adelantada)
11. Compensación de antemano por consiguiente amortiguamiento, amortiguar previamente	12. Equipotencialmente (traer cosas al mismo nivel)
13. “El otro camino alrededor” (realizarlo en reversa, hacerlo inversamente)	14. Incremento de la curvatura (curvatura esférica)
15. Partes dinámicas (dinámicamente, dinamización, dinámica)	16. Acciones parciales o excesivas (hacer un poco menos)
17. Cambio de dimensión (otra dimensión)	18. Vibración mecánica
19. Acción periódica	20. Continuidad de acción útil

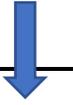


21. Apresurarse (saltar, apresurarse a través)	22. “Bendición para fingir” (convertir los daños en beneficios)
23. Retroalimentación	24. Intermediación (mediador)
25. Autoservicio	26. Copiando
27. Disposiciones baratas	28. Sustitución de interacción mecánica (uso de campos)
29. Neumáticos e hidráulicos	30. Escudos flexibles y películas delgadas
31. Materiales porosos	32. Cambios de propiedad óptica (cambio de color)
33. Homogeneidad	34. Descartar y recuperación
35. Cambios de parámetros (transformación de propiedades)	36. Transiciones de fase
37. Expansión térmica	38. Oxidantes fuertes (oxidación acelerada)
39. Atmósfera inerte (ambiente inerte)	40. Materiales compuestos

Fuente: Elaboración propia.

Una porción de la matriz de contradicciones se puede ver a continuación en la tabla 5

Tabla 5. Matriz de contradicciones en TRIZ (Adaptado)

		Peso del objeto móvil	Peso del objeto inmóvil	Longitud del objeto móvil	Longitud del objeto inmóvil	Área del objeto móvil	Área del objeto inmóvil
	Característica que se perjudica al cumplir el objetivo  Característica que se mejora al cumplir el objetivo 	1	2	3	4	5	6
1	Peso del objeto móvil		-	15,8,29,34	-	29,17,39,34	-
2	Peso del objeto inmóvil	-		-	10,1,29,35	-	35,30,13,2
3	Longitud del objeto móvil	8,15,29,34	-		-	15,17,4	-
4	Longitud del objeto inmóvil	-	35,28,40,29	-		-	17,7,10,40
5	Área del objeto móvil	2,17,29,4	-	14,15,18,4	-		-
6	Área del objeto inmóvil	-	30,2,14,18	-	26,7,9,39	-	

Fuente: Elaboración propia.

Proceso analítico jerárquico (AHP)

Este proceso fue formulado por Thomas Saaty [11] en los años 60, buscando diseñar una herramienta sencilla para ayudar a los responsables de la toma de decisiones [12].

La simplicidad y el poder de esta herramienta se ha probado en diversos campos y ha sido diseñada con el objetivo de estructurar, medir y sintetizar. Permitiendo así analizar efectos que genera un cambio en un nivel determinado sobre los niveles inferiores (figura , permite una vista amplia de los actores, objetivos y propósitos y da flexibilidad para abordar los cambios en algún elemento sin perder la estructura total [13]

El AHP se rige por tres principios y tres axiomas [11][13]:



Principio de descomposición: para lidiar con las complejidades el AHP permite descomponer el problema en subproblemas con una jerarquía determinada que son dependientes entre si con una determinada intensidad.

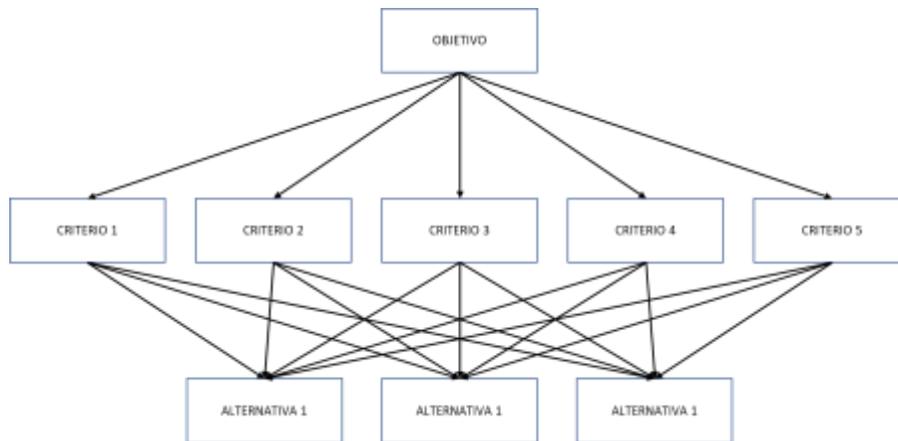
Juicios comparativos: permite realizar combinaciones en parejas entre elementos del mismo nivel jerárquico con respecto al criterio principal (comparaciones biunívocas)

Síntesis de prioridades: se producen prioridades globales a través de la multiplicación de las prioridades locales

Axioma recíprocal: Si frente a un criterio, una alternativa A es n veces mejor que B, entonces B es 1/n veces mejor que A.

Axioma de homogeneidad: los elementos que son comparados no deben ser muy diferentes respecto a la característica contra la cual se comparan.

Axioma de la síntesis: Los juicios acerca de las prioridades de los elementos en una jerarquía no dependen de los elementos de los niveles inferiores.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Jerarquía del AHP

Tabla 6. Escala cuantitativa de comparación de alternativas

Opción	Valor
Igual	1
Marginalmente fuerte	3
Fuerte	5
Muy fuerte	7
Extremadamente fuerte	9
Valores intermedios donde hay entradas difusas	2,4,6,8
Reflejan dominancia de la segunda alternativa comparada con la primera	Recíprocos

Fuente: Elaboración propia.

Los pasos descritos a continuación darán a grandes rasgos una idea de la facilidad de implementación del método, además de mostrar porque es tan utilizado para la toma de decisiones, tomados del ejercicio realizado por García [14]

1. Definición de criterios: se identifican los criterios determinantes para la selección de las alternativas disponibles. En este caso de ejemplo se usaron Costo (Co), Potencia (Po),



- Se realiza una comparación entre criterios dando una calificación según la tabla 5, si el criterio 1 es mayor que el dos se coloca el valor entero, si es al contrario se coloca el inverso como se puede ver en la tabla 6 como ejemplo.

Tabla 7. Tabla de criterios[14]

Criterios	Co	Po	Fl	Cm	Se	Ponderación
Co	1	2	5	5	1	0,364
Po	1/2	1	3	3	1	0,223
Fl	1/5	1/3	1	1	1/3	0,077
Cm	1/5	1/3	1	1	1/3	0,077
Se	1	1	3	3	1	0,259

- Comparación entre alternativas para cada criterio: las alternativas son comparadas entre sí y calificadas según sea el peso para cada criterio evaluado como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 8. Importancia de las alternativas con respecto a los costos y la potencia[14]

Cuadro 4. Importancia de las alternativas con respecto a los costos (RC=0,0462).

Alternativa	A1	A2	A3	Ponderación
A1	1	2	6	0,567
A2	1/2	1	6	0,357
A3	1/6	1/6	1	0,075

Cuadro 5. Importancia de las alternativas con respecto a la potencia (RC=0,0462).

Alternativa	A1	A2	A3	Ponderación
A1	1	6	9	0,77
A2	1/6	1	3	0,162
A3	1/9	1/3	1	0,068

- Para cada comparación realizada se debe calcular la relación de consistencia (RC), la cual es una forma de determinar la validez del ejercicio, dicha relación debe ser menor que 0,1. Siendo IC el índice de consistencia y el IA los índices aleatorios[14].

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (2)$$

- Por último, se totalizan las ponderaciones realizadas y se toma el mayor valor como la solución correcta.

Tabla 9. Resumen de la información[14]

Criterio	Alternativa			Producto		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Co (0,364)	0,567	0,357	0,075	0,206388	0,129948	0,0273
Po (0,223)	0,77	0,162	0,068	0,17171	0,036126	0,015164
Fl (0,077)	0,258	0,637	0,105	0,019866	0,049049	0,008085
Cm (0,077)	0,517	0,359	0,124	0,039809	0,027643	0,009548
Se (0,259)	0,226	0,674	0,101	0,058534	0,174566	0,026159
Suma				0,496307	0,417332	0,086256



Resultados y discusión

Existen una gran cantidad de metodologías y herramientas que pueden apoyar los procesos de diseño, de estas muchas pueden ser implementadas en el sector metalmeccánico, pero no todas sirven para las pequeñas y medias empresas por lo altos costos de implementación y complejidad.

Se seleccionaron las tres metodologías (AMEF, AHP, TRIZ) por ser las de más fácil implementación a corto plazo y de menor inversión monetaria, algo bastante significativo a la hora de adoptar nuevos procesos o tecnologías en estas pymes.

Las herramientas sugeridas, se pueden clasificar en orden ascendente según su curva de aprendizaje: AMEF, AHP, TRIZ. El AMEF solo requiere el uso de un formato y en lo posible de un equipo multidisciplinar. El AHP solo requiere el uso de una hoja de calculo que pueda hacer los cálculos matriciales de forma automática luego de ponderar los criterios y el TRIZ requiere de procesos de ideación y análisis de problemas que no van mas allá del uso de formatos y tablas ya estructuradas.

El AMEF es una herramienta que puede ser usada en las etapas de diseño conceptual y de detalle para priorizar los posibles fallos que se puedan presentar y atacarlos antes de continuar con el proceso de prototipado y fabricación.

El AHP es una herramienta muy poderosa para abordar calificación y selección de conceptos generados en la etapa de ideación y diseño conceptual, evitando así la selección subjetiva de soluciones, con los posibles problemas que esto pueda acarrear a futuro.

TRIZ es una herramienta con bastante aplicación a la hora de resolver contradicciones que se puedan generar en los procesos de diseño conceptual y de detalle. Dichas contradicciones afectan el impacto del diseño generado por lo que salir de la situación coyuntural de forma innovadora se hace indispensable.

Referencias

- [1] D. G. Ullman, *The Mechanical Design Process*. 2010.
- [2] a. M. King and S. Sivaloganathan, "Development of a Methodology for Concept Selection in Flexible Design Strategies," *J. Eng. Des.*, vol. 10, no. 4, pp. 329–349, 1999.
- [3] J. D. Booker, R. Lock, S. Williamson, and J. Freire Gómez, "Effective practices for the concept design of electromechanical systems," *J. Eng. Des. Technol.*, vol. 14, no. 3, pp. 489–506, 2016.
- [4] Chrysler, C. Ford Motor, and C. General Motors, *Analisis de Modo y Efecto de Falla Potenciales*. 2008.
- [5] Y. Z. Mehrjerdi, "Applications and extensions of quality function deployment," *Assem. Autom.*, vol. 30, no. 4, pp. 388–403, 2010.
- [6] M. R. Mansor, S. M. Sapuan, E. S. Zainudin, A. A. Nuraini, and A. Hambali, "Conceptual design of kenaf fiber polymer composite automotive parking brake lever using integrated



- TRIZ-Morphological Chart-Analytic Hierarchy Process method,” *Mater. Des.*, vol. 54, pp. 473–482, 2014.
- [7] M. MAYDA and H. R. BORKLU, “Development of an innovative conceptual design process by using Pahl and Beitz systematic design, TRIZ and QFD,” *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf.*, vol. 8, no. 3, pp. JAMDSM0031-JAMDSM0031, 2014.
- [8] E. Procedures, “Failure Analysis of FMEA,” vol. 307, no. August, pp. 46–49, 2005.
- [9] G. Altschuller, *The Innovation Algorithm-Triz, Systematic Innovation and Technical Creativity*. 1999.
- [10] G. Arcidiacono and L. Bucciarelli, “TRIZ: Engineering Methodologies to Improve the Process Reliability,” *Qual. Reliab. Eng. Int.*, vol. 32, no. 7, pp. 2537–2547, 2016.
- [11] T. L. Saaty, “How to make a decision: The analytic hierarchy process,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 48, no. 1, pp. 9–26, 1990.
- [12] N. Bhushan and K. Rai, “The Analytic Hierarchy Process,” *Strateg. Decis. Mak. Appl. Anal. Hierarchy Process*, p. 172, 2004.
- [13] J. C. Gómez and J. P. Cabrera, “El Proceso De Análisis Jerárquico (Ahp) Y La Toma De Decisiones Multicriterio. Ejemplo De Aplicación.,” *Sci. Tech.*, vol. XIV, no. 39, pp. 247–252, 2008.
- [14] J. García, S. Noriega, J. J. Díaz, and J. de la Riva, “Aplicación del proceso de jerarquía analítica en la selección de tecnología agrícola,” *Agron. Costarric.*, vol. 30, no. 1, pp. 107–114, 2005.



Fabricación y Micro Ensamblaje de Antenas en Impresión 3D

Manufacturing and Micro Assembly of Antennas with 3D Printing

David Sebastián Matamoros Buitrago^{1, γ}, German Augusto Ramírez Arroyave¹, Ernesto Córdoba Nieto¹, Javier Leonardo Araque¹

1. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional, Bogotá, Colombia.
2. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional, Bogotá, Colombia.
3. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional, Bogotá, Colombia.
4. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional, Bogotá, Colombia.
γ. Autor correspondal: dsmatamorosb@unal.edu.co

Resumen

Las tecnologías de fabricación desarrolladas en años recientes han generado modelos de procesos de manufactura variados, entre estos la fabricación 3D que continúa siendo una tecnología en auge y aún presenta bastantes retos a la hora de la producción bajo condiciones específicas. En el siguiente artículo se mostrará el proceso de fabricación y ensamblaje de un prototipo de antena ultra-compacta diseñada por medio de técnicas de optimización electromagnética, el cual puede ser ampliamente usado bajo el paradigma de la industria 4.0 y el IoT¹.

Palabras clave: Micro manufactura aditiva, Antenas compactas, Impresión 3D, GPS (Geometrical Product Specification), Transmisión.

Abstract

The manufacturing technologies developed in recent years, have generated varied models of manufacturing process, like 3D printing that still booming and challenge us at the time of production under specific conditions. The next article will show a manufacturing and assembly process of an ultra-compact antenna prototype designed by electromagnetic optimization techniques, that can be use under the 4.0 industry and IoT¹ paradigms widely.

Keywords: additive micromanufacturing, Compact antennas, 3D printing, GPS (Geometrical Product Specification), Transmission.

Introducción

Los procesos de manufactura se están llevando a nuevas escalas dado el avance tecnológico que se desarrolla en diferentes campos, más frecuentemente en los dispositivos electrónicos como lo son: memorias, antenas, microprocesadores, cámaras, etc. También estos desarrollos de miniaturización se ha llevado a los procesos de manufactura de dispositivos médicos para la limpieza de vías cardíacas y/o los equipos no invasivos para cirugías de alta complejidad, disminuyendo el riesgo de la operación al igual que el tiempo de recuperación del paciente [1] [2]; de igual manera, la creación de formas complejas de dimensiones nanométricas ha sido un desarrollo muy fuerte para la industria de telecomunicaciones y almacenamiento de información, como se evidenció con la

¹ Internet of Things.



creación y desarrollo del microscopio de efecto túnel, capaz de manejar estructuras moleculares individualmente por parte de la empresa IBM [3].

En el siguiente documento se mostrará el proceso de ensamble de una antena ultra-compacta para operaciones de doble banda, diseñada por la técnica de optimización electromagnética descritas en [4] y [5].

Objetivo

- Generar un modelo del proceso para la fabricación y ensamble de micro antenas.
- Reconocer las capacidades de la Impresora Edén 260V [6] para el desarrollo de micro tecnología enfocada a sistemas mecatrónicos.

Desarrollo del trabajo

El diseño de esta antena puede ser visto como la evolución de los esfuerzos presentados en [a, b], donde se han incluido paredes verticales que interconectan los parches horizontales con el fin de alcanzar estructuras que presenten caminos más largos para las corrientes, logrando reducir el área ocupada por la antena a la vez que se hace un uso más eficiente del volumen disponible. Como se puede apreciar en la Figura 1, el resultado es una especie de laberinto ortogonal con retícula cúbica base de 2.16 mm de arista, pared delgada de 0.16 mm y 2 niveles.

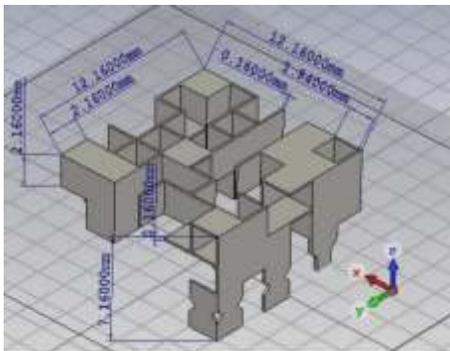


Figura 1: Diseño de antena y sus dimensiones

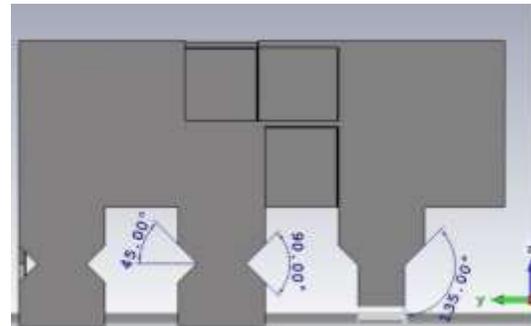


Figura 2:Detalle de conectores de la antena diseñada

Esta antena tiene 3 extrusiones que sobresalen del primer nivel, son las terminales de conexión, las cuales están basadas en la unidad básica cúbica, además tiene ranuras con ángulo de 45 grados para asegurar el buen contacto con el sistema de generación - recepción electromagnética, el cual estará encargado de modular y demodular las señales según el modo en que esté funcionando la antena en ese instante de tiempo; la estructura fabricada corresponde a un diseño no convencional ultra-compacto de una antena que opera simultáneamente en dos bandas de frecuencia (banda dual).

Este diseño fue un cambio utilizando algoritmos genéticos empleando individuos codificados con 300 bits realizado por el Ingeniero German Augusto Ramírez Arroyave de la Universidad Nacional de Colombia, partiendo del diseño de los resultados de trabajos relacionados [7] [4] [8] como parte de una investigación para su doctorado, apoyando el desarrollo de antenas 3D del grupo de investigación en electrónica de alta frecuencia y telecomunicaciones (CMUN) y el desarrollo del ensamblaje de esta se hizo en colaboración con el grupo de trabajo en nuevas tecnologías de diseño y manufactura-automatización (DimaUN).



A continuación, se describen las opciones tecnológicas para la fabricación del prototipo, así como el proceso de impresión y ensamblaje de este, sin embargo, es importante destacar que para el uso efectivo de la antena, el dispositivo fabricado debe tener un recubrimiento metálico de alta conductividad, trabajo que actualmente está en curso.

Posibles metodologías. [9] [10]

Se exploraron diferentes opciones para su fabricación tales como doblado de pared delgada, impresión 3D por sinterizado de metales, o la impresión polyjet. Las 2 primeras se descartaron dado que la resolución mínima de estos y la complejidad geométrica de la antena hacían imposible un buen resultado, además el costo del segundo proceso es bastante elevado. Al final se optó por la impresión polyjet dado que el equipo es el que se tiene a disposición en el laboratorio LabFabEx y al añadir el costo de la metalización necesaria para poder ser usada como antena es más económico que las otras tecnologías comparadas. En el siguiente cuadro se muestra una comparación de los 3 métodos evaluados para la fabricación de las antenas.

Tabla 1: Metodologías posibles de fabricación

Tecnología	Pros	Contras	Espesor mínimo
Doblado de lámina	<ul style="list-style-type: none">• El material es completamente metálico.• Se puede asegurar los ángulos de los dobleces.• Bajo coste.• Se puede seleccionar el metal deseado.	<ul style="list-style-type: none">• La geometría diseñada es bastante compleja para hacer en una sola pieza.• Se debe utilizar soldadura para unir las piezas.	0.4 mm
Sinterizado laser	<ul style="list-style-type: none">• Puede hacerse de una sola pieza.• Se puede garantizar precisión geométrica.• Aceptable resistencia térmica y mecánica.	<ul style="list-style-type: none">• Alto coste.• El acabado superficial es burdo y requiere postproceso de pulido.• Los materiales para sinterizar son limitados.	0.33 mm
Impresión 3D(FDM)	<ul style="list-style-type: none">• Fácil fabricación.• Bajo coste.• La unión de varias piezas no requiere soldadura o pegamento adicional.	<ul style="list-style-type: none">• Demasiados detalles geométricos no contemplados.• La geometría diseñada es bastante compleja para hacer en una sola pieza.	0.4 mm
Impresión 3D(Polyjet)	<ul style="list-style-type: none">• Fácil fabricación.• Mediano coste.• Limpieza fácil de realizar.• Resolución adecuada para la geometría.• Gran variedad de materiales no metálicos.	<ul style="list-style-type: none">• La geometría diseñada es bastante compleja para hacer en una sola pieza.• Materiales no metálicos.• La unión de las piezas requiere adhesivos adicionales.	0.16 mm



Metodología seleccionada para la fabricación

Para el proceso de fabricación se hace uso de la impresora/prototipadora 3D Edén 260V la cual posee una resolución mínima de 160 micras y dadas las dimensiones de la antena, esta es una buena opción para su fabricación. Dada la complejidad del modelo, se decide dividir la antena en 2 secciones con el fin de evitar paredes horizontales que requieren de soportes de impresión [11], cada sección corresponde a un nivel de la antena; otra de las ventajas de esta división es que se evitan las cavidades cerradas en la impresión donde puede haber acumulación de material. En las figuras 3 y 4 se ilustra cómo se dividió la antena en sus 2 niveles básicos.

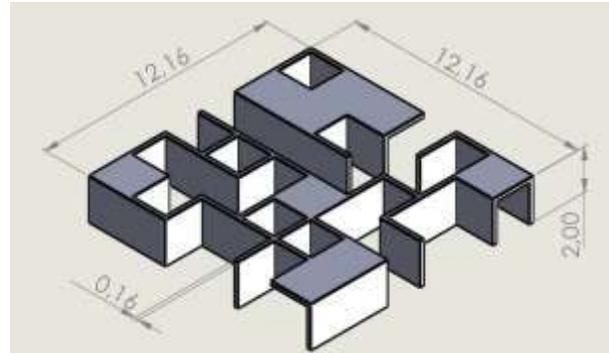
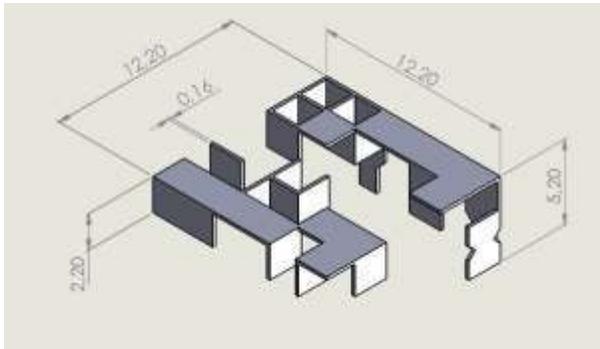


Figura 3: Corte del primer nivel de la antena. Figura 4: Corte del segundo nivel de la antena

Los parámetros usados para obtener los mejores resultados de impresión para estos modelos fueron los siguientes:

- Acabado: Brillante.
- Calidad: Alta calidad.
- Propiedades avanzadas: Pesado.

Los cuales generaron el mejor resultado comparativo para este diseño, el cual se muestra en la figura 5.



Figura 5: Antenas impresas en equipo Eden 260V.

Una vez seleccionada la metodología de fabricación se plantea metalizar las antenas para darle las propiedades conductivas necesarias para la transmisión y recepción de datos; realizada la metalización de toda la superficie se analizan las de tolerancias dimensionales y geométricas para



verificar que la metalización no cambió de manera drástica los valores de la antena y poder realizar simulaciones con un modelo cercano a la antena real, estas simulaciones deben estar fundamentadas en los parámetros prácticos hallados de la antena, como lo son la densidad de potencia radiada, directividad, ganancia, polarización, impedancia, su área y longitud efectivas; todos estos parámetros fundamentales en el análisis de antenas [12]

Ensamble

Una vez se realiza el modelado se procede a realizar el dispositivo de ensamblaje de las antenas; se realizaron 4 versiones en las cuales se variaron diferentes aspectos del proceso de fabricación, como lo fueron dimensiones, orientación y acabado.

El diseño se muestra a continuación con las mismas medidas de la antena.

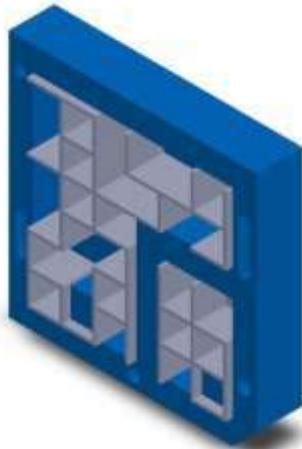


Figura 6: Diseño de molde piso 2

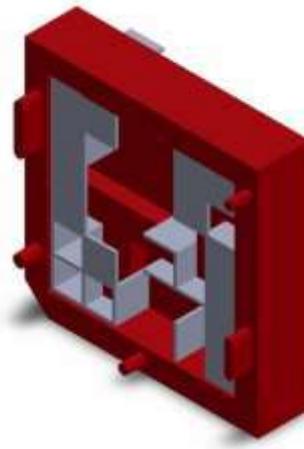


Figura 7: Diseño de molde piso 1

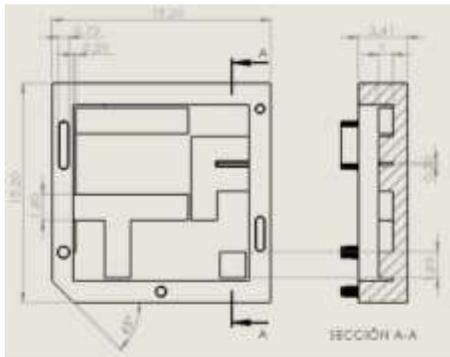


Figura 8: Medidas diseño de molde piso 1

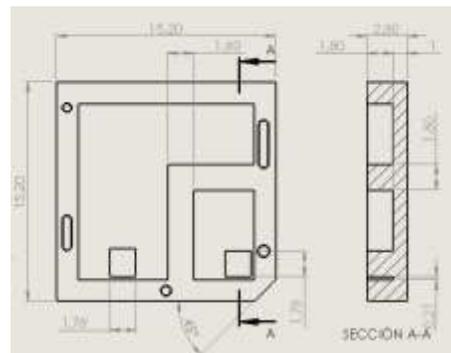


Figura 9: Medidas diseño de molde piso 2

Este diseño no tiene tolerancias dimensionales ni geométricas, dado que este primer ensayo se realizó con el objetivo de verificar cuál es la medida mínima a la cual se puede hacer una ranura o protrusión, y cuál es la relación entre la medida diseñada y la medida real.

El resultado fue el siguiente:



Figura 10: Impresión de dispositivo 1 nivel 1

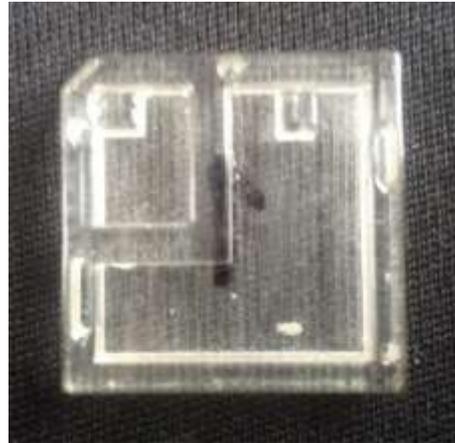


Figura 11: Impresión de dispositivo 1 nivel 2

Con el equipo Zoller² [13] se realizó la verificación básica de las dimensiones críticas del dispositivo las cuales se evidencian en las figuras 12 y 13:

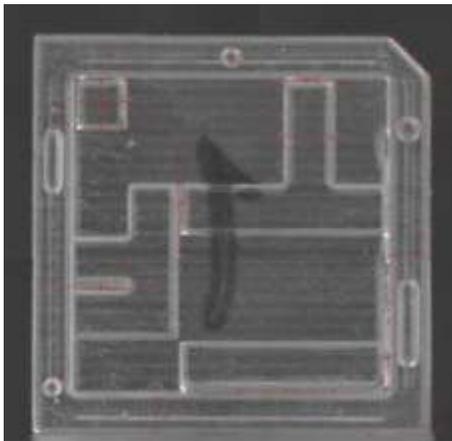


Figura 12: Mediciones molde 1 nivel 1 con equipo Zoller.

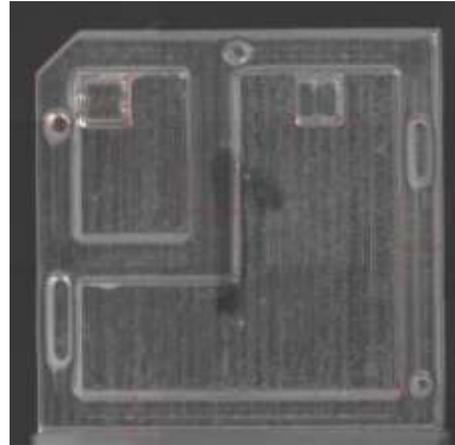


Figura 13: Mediciones molde 1 nivel 2 con equipo Zoller.

Para el segundo diseño se modificó el valor de la escala de la impresión a 1.001 para evidenciar algunos cambios de dimensiones imperceptibles para el ojo humano, también se buscaba aumentar los espacios en las ranuras para ver la dimensión necesaria para estas. Podemos ver el resultado en las figuras 14 y 15:

² Dispositivo computarizado de verificación metrológica de 2.5D para la verificación geométrica de herramientas y piezas de materiales metálicos y no metálicos.

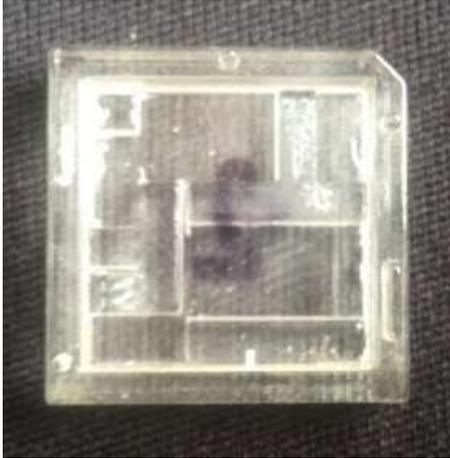


Figura 14: Impresión de dispositivo 2 nivel 1

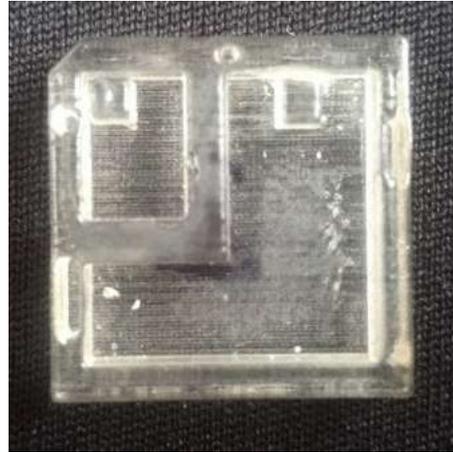


Figura 15: Impresión de dispositivo 2 nivel 2

También se realizó la verificación de las medidas diseñadas y escaladas con el equipo Zoller como se evidencia en las figuras. 16 y 17.

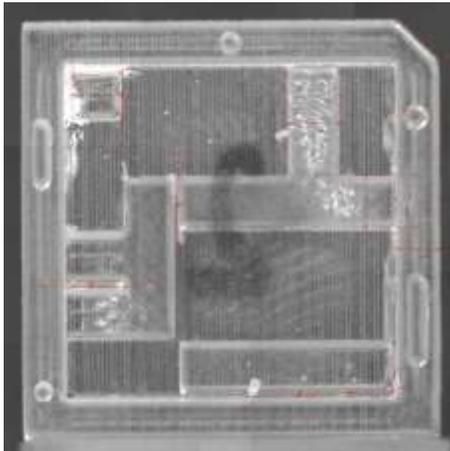


Figura 16: Mediciones molde 2 nivel 1. con equipo Zoller

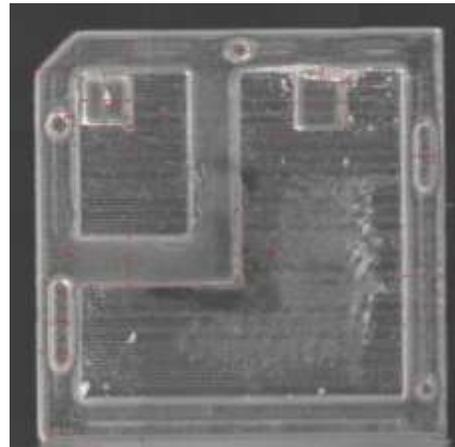


Figura 17: Mediciones molde con equipo Zoller. 2 nivel 2

Para el tercer diseño, se realizó una reorientación del modelo para su impresión, dejando que las partes críticas como ranuras y espacios entre paredes quedaran en el plano XY, es decir, que el eje Z era el directamente involucrado en estas zonas debido a que este eje es el que maneja la mayor resolución por la construcción de la máquina.



Figura 18: Impresión de dispositivo 3 nivel 1



Figura 19: Impresión de dispositivo 3 nivel 2

También se realizó la verificación de las medidas en el equipo Zoller, como se muestra en la figura, y se evidencian cambios en las medidas con respecto al molde 2.

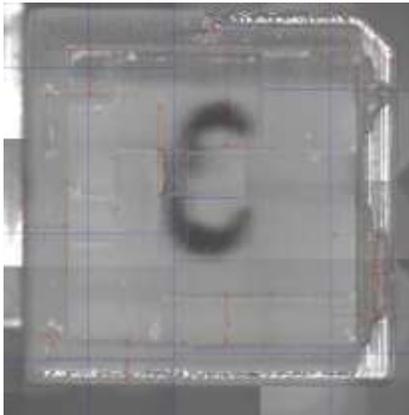


Figura 20: Mediciones molde 3 nivel 1 con equipo Zoller.

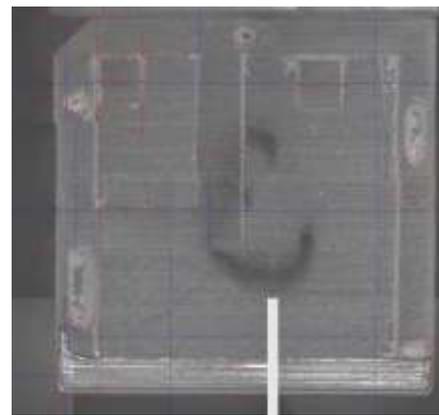


Figura 21: Mediciones molde 3 nivel 2 con equipo Zoller.

El último diseño se realizó un redimensionamiento de esas zonas críticas para facilitar el ensamblaje de la antena con el dispositivo. Todo este redimensionamiento se realizó siguiendo las recomendaciones tanto de la norma ISO 2768 como del fabricante de la maquina Edén 260 V, además de las observaciones realizadas en la primera prueba exploratoria de la creación de espacios estrechos y ranuras en una pieza.

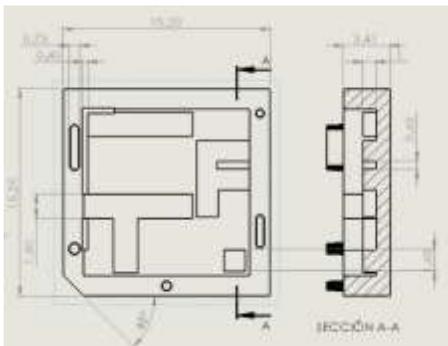


Figura 22: Diseño de molde piso 1

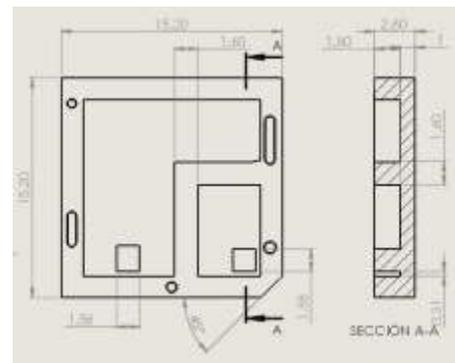


Figura 23: Diseño de molde piso 2



En las imágenes 24 y 25 podemos observar como encajan las 2 secciones de la antena con su respectivo molde de ensamblaje, se evidenció una mejora significativa con relación al molde 2, lo que permite evidenciar la importancia de las tolerancias geométricas y dimensionales sobre todo en este tipo de micro ensamblajes al igual que una correcta orientación en la impresión 3D.



Figura 24: Impresión de dispositivo 4 nivel 1



Figura 25: Impresión de dispositivo 4 nivel 2

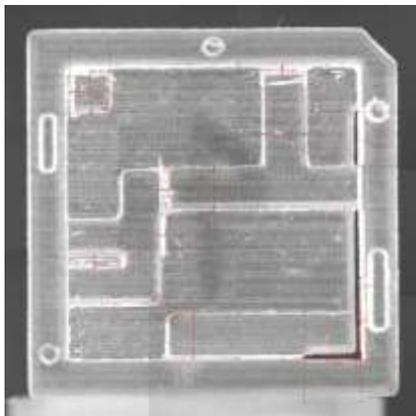


Figura 26: Mediciones molde 4 nivel 1 con equipo Zoller.



Figura 27: Mediciones molde 4 nivel 2 con equipo Zoller.

Una vez se realiza este molde se procede a realizar el ensamblaje. Para el molde 2 se pudo ensamblar en la sección del molde que no tiene ranura pasante, pero para el molde 4 se evidencia una mejora significativa en todo el molde de ensamblaje, para el correcto montaje de la antena se plantea utilizar un adhesivo que no sea viscoso, y que las prestaciones de rigidez requeridas sean las adecuadas para la aplicación.

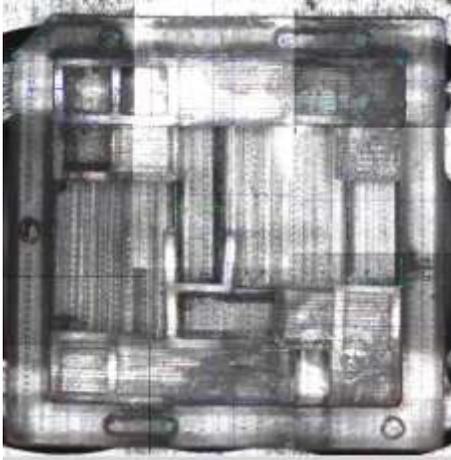


Figura 28: Ensamblaje en molde 4 piso 1, equipo Zolle

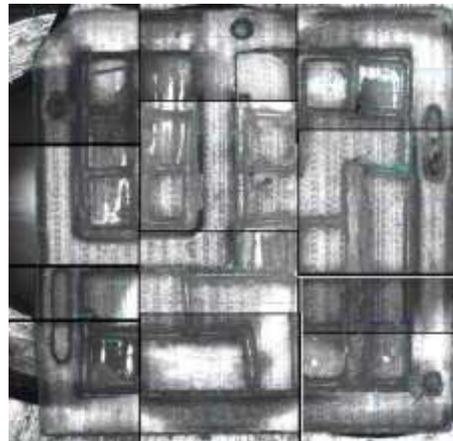


Figura 29: Ensamblaje en molde 4 piso 2, equipo Zoller

Todas las medidas del dispositivo se encuentran en el anexo # 1, con su respectiva comparación y medidas reales.

Por último, como parte de un estudio adicional se hizo el análisis de rugosidad del molde 4 en sus 2 pisos siguiendo las recomendaciones para mediciones de rugosidad de la norma ISO 1302:2002 hechas con el rugosímetro TESA rugosurf 10G [14].

Siguiendo el método de la norma se hallaron los siguientes valores:

Tabla 2: Valores de rugosidad del molde.

	Ra[μm]	Rq[μm]	Rt[μm]	Rp[μm]
1	0.460	0.522	1.886	0.452
2	0.465	0.625	3.751	1.214
3	0.357	0.402	1.682	0.453

Discusión de Resultados

Se realizó el ensamble con un pegamento fino colocando una capa sobre una superficie no porosa y ubicando la sección inferior del ensamble (piso 1 y antena sección 1) para que los bordes de las paredes del piso 1 de la antena tuvieran pegamento, después se ensambló con la sección superior (piso 2 y antena sección 2) y se aplicó presión dejando que seicara por 4 horas en un ambiente ventilado y con buena iluminación, esto con el fin que la antena tuviera la consistencia y adhesión necesarias para su correcto funcionamiento. El resultado se ve en las siguientes imágenes:



Figura 30: Ensamblaje finalizado de la antena

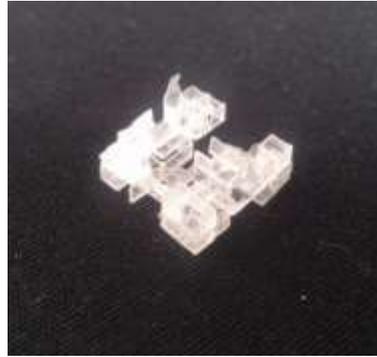


Figura 31: Ensamblaje finalizado de la antena

Por otra parte, el proceso de ensamblaje se puede replicar para la micro fabricación industrializada de este tipo de dispositivos dado que los elementos usados en este proceso son replicables bajo las mismas condiciones en diferentes máquinas de la misma tecnología.

Dada la complejidad del proceso tanto de impresión y limpieza como el de ensamblaje, el resultado se puede optimizar haciendo el correcto diseño inicial CAD, pensando a partir de un proceso de manufactura y haciendo la combinación de 2 procesos de diseño (diseño para fabricación y diseño por optimización electromagnética, encontrando un equilibrio entre estos dos), y de esta manera convertirlo en un proceso aplicado al paradigma actual tanto de manufactura y micro fabricación, como de comunicación IoT.

Conclusiones

El proceso de manufactura de una antena de dimensiones micrométricas requiere el uso de equipos de alta precisión, exactitud y repetibilidad, además se debe tener clara la metodología de fabricación para entender la afectación que tienen los cambios de las variables durante el proceso de fabricación, ensamble y desensamble.

El diseño de este tipo de micro antenas debe ser enfocado como un proceso interdisciplinario para que se tenga el conocimiento de las dinámicas conceptuales eléctricas y mecánicas del dispositivo.

Al momento de hacer la verificación de las tolerancias geométricas y dimensionales, se deben tener equipos que tengan mejor resolución que la que se tiene en el proceso de fabricación, con el fin de tener mediciones cercanas a los valores reales de la pieza. En las verificaciones que se realizaron de las antenas, se puede evidenciar, variaciones de 0.02 mm 0.04 mm en las longitudes de 16 mm en las antenas, y variaciones de décima de grado con referencias a ángulos rectos.

En los procesos de manufactura aditiva es importante tener los rangos límites en los cuales el equipo puede trabajar al igual que tener claridad en el procedimiento, limitaciones para generar errores imprevistos en la fabricación de piezas. La impresora Edén 260V tiene una resolución de hasta micrómetros (16 micras); el material al ser líquido absorbe humedad y modifica las dimensiones; se deben realizar las mediciones necesarias una vez se evapore el agua absorbida.

La rugosidad de la antena es la apropiada para realizarle un proceso de metalizado por diversas técnicas. En este proceso se debe tener cuidado con el espesor de la capa de recubrimiento y con el efecto de borde que puede generarse debido a las discontinuidades en el recubrimiento, debido a la forma de la antena realizada.



El trabajo interdisciplinar entre el Grupo DIMA-UN y el CMUN presenta nuevas oportunidades para el aprendizaje de los involucrados dado que se desarrollan soluciones completas que tiene un aspecto técnico robusto y fundamentado, basado en los conocimientos adquiridos de cada una de las partes. Para el caso de la antena, estos fundamentos combinan tanto técnicas de fabricación y ensamblaje bajo los aspectos mecánicos como análisis de las propiedades futuras que puede adquirir la antena bajo el método de fabricación propuesto.

La creación de micro antenas impulsa de manera drástica el desarrollo de las comunicaciones, que son parte fundamental de la nueva industria 4.0, dándole un enfoque globalizado en el que todos los equipos, dispositivos o “cosas”, puedan generar información que puede ser utilizada en cualquier proceso, natural o industrial.

En la industria médica se podría implementar dispositivos de ayuda vital y no vital, que transmitan no solo la variable controlada (saturación de oxígeno, pulsaciones por minuto, presión sanguínea), sino también demás variables indirectas que puedan ser relevantes a la hora de realizar un diagnóstico. Del mismo modo esta filosofía se puede implementar en procesos industriales para mantenimiento de tipo predictivo, preventivo y correctivo, como trazabilidad de proceso (figura 32).



Figura 32: Posibles aplicaciones de las micro antenas

Referencias

- [1] p. d. M. Clinic, «Mayo Clinic,» 30 Diciembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.mayoclinic.org/es-es/tests-procedures/minimally-invasive-surgery/about/pac-20384771>. [Último acceso: 20 Julio 2018].



- [2] A. A. O. OPHTHALMOLOGY, «AMERICAN ACADEMY OF OPHTHALMOLOGY,» OjosSanos TM, 12 Diciembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.aao.org/salud-ocular/tratamientos/lasik-cirugia-ocular-con-laser>. [Último acceso: 20 Julio 2018].
- [3] G. B. a. H. F. a. C. G. a. H. R. a. E. S. a. E. Tosatti, «Energy-Dependent State-Density Corrugation of a Graphite Surface as Seen by Scanning Tunneling Microscopy,» *EPL (Europhysics Letters)*, vol. 1, n° 1, p. 31, 1986.
- [4] J. Araque Quijano and G. Vecchi, «Optimization of a compact frequency- and environment-reconfigurable antenna,» *IEEE Transactions on*, vol. 60, n° 6, p. 2682–2689, 2012.
- [5] E. M. Yahya Rahmat-Samii, *Electromagnetic optimization by genetic algorithms.*, 1999.
- [6] Stratasys, «Eden 260V 3-D printer System,» Eden Prairie, 2016.
- [7] M. S. G. R. a. J. A. D. Rodriguez, «Realization of a compact reconfigurable antenna,» de *IEEE-APS Topical Conference*, Palm Beach, Aruba, 2014.
- [8] G. A. R. A. a. J. L. A. Quijano, «Dual-port reconfigurable planar antennas for diversity and duplexing,» de *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, 2016.
- [9] P. Jackson, *Folding techniques for designers: from*, Laurence King Publishing, 2016.
- [10] J. B. Jhon Benbow, *Paste Flow and Extrusion*, 1993.
- [11] B. L. R. Samuel N. Bernier, *Design for 3D printing: scanning.*, Maker Media, 2016.
- [12] A. V. Miguel Ferrando, «Antenas, Introducción, Parametros de antenas.» [En línea]. Available: http://www.upv.es/antenas/Documentos_PDF/Notas_clase/Tema_1.PDF. [Último acceso: 30 9 2018].
- [13] Zoller, «320|420|620 smile,» Luisburgo, 2016.
- [14] I. O. f. Standardization, *ISO 1302:2002*, International Organization for Standardization, 2002.

Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por Universidad Nacional de Colombia - DIB, código HERMES # 37158. Colciencias – Proyecto 110171551855.

Laboratorio sala CAM - LabFabEx.



Grupo de investigación DIMA-UN.

Yamid Gonzalo Reyes
Investigador DIMA-UN.

Tutoría

Ernesto Córdoba Nieto.
Director de investigación Grupo DIMA-UN

Tabla 2: Comparativa datos experimentales con datos diseñados

Descripciones	Área 2: (Reformado, base de rigidez de montaje electrónico)		Medidas diseñadas	Medidas reales		
	Imagen	Imagen Espina (difer)				
27	Dispositivo impreso en material fotolitográfico BGD 720 (Temperatura multipropósito) de Stratasys en la Máquina Edc 260 V, mismas dimensiones de la antena diseñada.	Calidad: High Quality. Acabado: Gris. Orientación del sistema coordinado de la placa superior, en sistema coordinado de máquina* a, b → (U,M) a*(0,1,0), r*(0,0,1)			Espesor de pared: 1.8 mm Altura de pared: 1.8 mm Alto: 2.80 mm Largo: 15.22 mm Ancho: 15.22 mm Ángulo de chafas 45°	Espesor de pared: 1.6603 mm Altura de pared: 1.7863 mm Alto: 2.7803 mm Largo: 15.2204 mm Ancho: 15.2204 mm Ángulo de chafas 44.48°
28	Dispositivo impreso en material fotolitográfico BGD 720 (Temperatura multipropósito) de Stratasys en la Máquina Edc 260 V, mismas dimensiones de la antena diseñada.	Calidad: High Quality. Acabado: Gris. Orientación del sistema coordinado de la placa inferior, en sistema coordinado de máquina* a, b → (U,M) a*(1,0,0), r*(0,0,1)			Espesor de pared: 1.8 mm Alto: 3.41 mm Largo: 15.22 mm Ancho: 15.22 mm Paredes: 0.28 mm Altura de pared inferior: 3 mm Altura de pared superior: 2.41 mm Ángulo de chafas 45°	Espesor de pared: 1.821 ± 0.02 mm Alto: 3.441 ± 0.03 mm Largo: 15.2204 mm Ancho: 15.2204 mm Paredes: 0.28 ± 0.03 mm Altura de pared inferior: 3.006 ± 0.03 mm Altura de pared superior: 2.444 ± 0.03 mm Ángulo de chafas 45°
29	Dispositivo impreso en material fotolitográfico BGD 720 (Temperatura multipropósito) de Stratasys en la Máquina Edc 260 V, mismas dimensiones de la antena diseñada con un costo de 1.000.	Calidad: High Quality. Acabado: Gris. Orientación del sistema coordinado de la placa superior, en sistema coordinado de máquina* a, b → (U,M) a*(1,0,0), r*(0,0,1)			Espesor de pared: 1.804 mm Altura de pared: 1.804 mm Alto: 2.884 mm Largo: 15.656 mm Ancho: 15.656 mm Ángulo de chafas 45°	Espesor de pared: 1.804 ± 0.01 mm Altura de pared: 1.8018 ± 0.01 mm Alto: 2.8828 ± 0.02 mm Largo: 15.6501 mm Ancho: 15.651 ± 0.01 mm Ángulo de chafas 45°
30	Dispositivo impreso en material fotolitográfico BGD 720 (Temperatura multipropósito) de Stratasys en la Máquina Edc 260 V, mismas dimensiones de la antena diseñada con un costo de 1.000.	Calidad: High Quality. Acabado: Gris. Orientación del sistema coordinado de la placa inferior, en sistema coordinado de máquina* a, b → (U,M) a*(0,1,0), r*(0,0,1)			Espesor de pared: 1.804 mm Alto: 3.52 mm Largo: 15.656 mm Ancho: 15.656 mm Paredes: 0.28 mm Altura de pared inferior: 1.54 mm Altura de pared superior: 2.02 mm Ángulo de chafas 45°	Espesor de pared: 1.814 ± 0.01 mm Alto: 3.52 ± 0.04 mm Largo: 15.656 mm Ancho: 15.656 mm Paredes: 0.28 ± 0.01 mm Altura de pared inferior: 1.51 ± 0.01 mm Altura de pared superior: 2.023 ± 0.02 mm Ángulo de chafas 45.67°
31	Dispositivo impreso en 2 acciones en material fotolitográfico BGD 720 (Temperatura multipropósito) de Stratasys en la Máquina Edc 260 V. Facilita el cambio en la orientación principal de la impresión al igual que el tipo de acabado.	Calidad: High Quality. Propiedades Avanzadas: Heavy. Acabado: Gris. Orientación del sistema coordinado de la placa superior, en sistema coordinado de máquina* a, b → (U,M) a*(0,1,0), r*(0,1,0)			Espesor de pared: 1.804 mm Altura de pared: 1.804 mm Alto: 2.884 mm Largo: 15.656 mm Ancho: 15.656 mm Ángulo de chafas 45°	Espesor de pared: 1.804 ± 0.01 mm Altura de pared: 1.804 ± 0.01 mm Alto: 2.884 ± 0.02 mm Largo: 15.651 ± 0.02 mm Ancho: 15.652 ± 0.02 mm Ángulo de chafas 45.33°
32	Dispositivo impreso en 2 acciones en material fotolitográfico BGD 720 (Temperatura multipropósito) de Stratasys en la Máquina Edc 260 V. Facilita el cambio en la orientación principal de la impresión al igual que el tipo de acabado.	Calidad: High Quality. Propiedades Avanzadas: Heavy. Acabado: Gris. Orientación del sistema coordinado de la placa inferior, en sistema coordinado de máquina* a, b → (U,M) a*(0,0,1), r*(0,1,0)			Espesor de pared: 1.803 mm Alto: 3.41 mm Largo: 15.656 mm Ancho: 15.656 mm Paredes: 0.28 mm Altura de pared inferior: 1.803 mm Altura de pared superior: 1.65 mm Ángulo de chafas 45°	Espesor de pared: 1.813 ± 0.02 mm Alto: 3.402 ± 0.03 mm Largo: 15.65 ± 0.01 mm Ancho: 15.65 ± 0.03 mm Paredes: 0.279 ± 0.02 mm Altura de pared inferior: 1.8 ± 0.02 mm Altura de pared superior: 1.65 ± 0.02 mm Ángulo de chafas 44.28°
33	Dispositivo impreso en 2 acciones en material fotolitográfico BGD 720 (Temperatura multipropósito) de Stratasys en la Máquina Edc 260 V. Fue un desafío con tolerancias dimensionales de 0.1 mm en todos los canales y canales pasivos. También se realizó el montaje con los antenas impresas bajo las mejores condiciones del proceso.	Calidad: High Quality. Propiedades Avanzadas: Heavy. Acabado: Negro. Orientación del sistema coordinado de la placa superior, en sistema coordinado de máquina* a, b → (U,M) a*(0,1,0), r*(0,0,1)			Espesor de pared: 1.80 mm Altura de pared: 1.80 mm Alto: 2.80 mm Largo: 15.22 mm Ancho: 15.22 mm Ángulo de chafas 45°	Espesor de pared: 1.518 ± 0.08 mm Altura de pared: 1.80 ± 0.01 mm Alto: 1.80 ± 0.03 mm Largo: 15.22 ± 0.01 mm Ancho: 15.31 ± 0.01 mm Ángulo de chafas 44.98°
34	Dispositivo impreso en 2 acciones en material fotolitográfico BGD 720 (Temperatura multipropósito) de Stratasys en la Máquina Edc 260 V. Fue un desafío con tolerancias dimensionales de 0.1 mm en todos los canales y canales pasivos. También se realizó el montaje con los antenas impresas bajo las mejores condiciones del proceso.	Calidad: High Quality. Propiedades Avanzadas: Heavy. Acabado: Negro. Orientación del sistema coordinado de la placa inferior, en sistema coordinado de máquina* a, b → (U,M) a*(0,1,0), r*(0,0,1)			Espesor de pared: 1.80 mm Alto: 3.41 mm Largo: 15.22 mm Ancho: 15.22 mm Paredes: 0.28 mm Altura de pared inferior: 3 mm Altura de pared superior: 2.41 mm Ángulo de chafas 45°	Espesor de pared: 1.81 ± 0.01 mm Alto: 3.41 ± 0.02 mm Largo: 15.22 ± 0.01 mm Ancho: 15.22 ± 0.01 mm Paredes: 0.27 ± 0.01 mm Altura de pared inferior: 3.00 ± 0.01 mm Altura de pared superior: 2.40 ± 0.02 mm Ángulo de chafas 44.81°



Diseño de una Máquina para Descascarar Nueces Medicinales *Lecythis Minor* para Obtención de Selenio

Nutcracker Machine Design for Medicinal *Lecythis Minor* Nuts for Selenium Extraction

Carlos Porto Romero¹, Fabián Bolívar Ortigón¹, Hernando Sánchez Moreno², Eugenio Yime Rodríguez³, Javier Roldán Mckinley^{3,4}

1. Ingeniero Mecánico, Universidad del Atlántico, Puerto Colombia, Colombia
2. Universidad Simón Bolívar, Barranquilla, Colombia
3. Grupo DIMER, Ingeniería Mecánica, Puerto Colombia, Colombia
4. Autor correspondiente: javierroldan@mail.uniatlantico.edu.co

Resumen

Se presenta la aplicación de la metodología del diseño conceptual para evaluar alternativas y proponer una máquina para quebrar la cáscara de nueces *Lecythis minor* cultivada en Magdalena-Colombia, las cuales se exportan para la extracción de selenio con fines medicinales. La seguridad estructural de los principales elementos fue evaluada por simulación de análisis de elemento finito con SolidWorks. Estos resultados fueron contrastados con los factores de seguridad obtenidos mediante aplicación de ecuaciones de teoría de falla, evidenciando concordancia entre ellos. Para el rompimiento de la nuez se ideó un rodillo dentado que se dimensionó con base en los tamaños límites de una muestra de nueces. Para generar el espacio de quiebre de la nuez, se propone una placa móvil accionada mediante mecanismo autoasegurante. La combinación de motor y transmisión seleccionada permitió proponer una máquina con una capacidad de producción teórica de hasta 5000 nueces por minuto.

Palabras clave: *Lecythis minor*, rompenueces, diseño de máquinas

Abstract

It is presented the conceptual design process of a nutcracker machine for *Lecythis minor*, a nut harvested in Magdalena, Colombia. This nut is exported and used to extract selenium for medical purposes. The structural safety of the main elements was evaluated by finite element analysis simulation with SolidWorks. These results were contrasted with the safety factors obtained by applying fault theory equations. It was yield accordance between equation and simulation results. Based on the limit sizes of a nuts sample, a toothed roll was designed for breaking the nut. A self-locking mechanism moves a plate that is used to generate the nut breaking space based on its size. A machine with an ideal breaking capacity up to 5000 nuts per minute was proposed, as a result of the selected motor and transmission ratio.

Keywords: *Lecythis minor*, nutcracker, machine design

Introducción

Desde hace dos décadas se conoce que el Selenio (Se) en concentraciones muy bajas cumple un papel muy importante en el mantenimiento de los sistemas inmunológicos y circulatorios de los organismos. Una deficiencia de este elemento traza puede acarrear su debilitamiento y con él la



aparición de enfermedades cardíacas y algunos tipos de cáncer [1,2] En general, las especies animales obtienen este micro elemento de los vegetales, especialmente de los cereales y estos a su vez lo obtienen del suelo cuando el suelo los contiene [2]. En países donde la presencia del Se en el suelo es nula o muy baja, las personas podrían presentar en algún momento de su vida deficiencia de este elemento. Por esta razón, el Se en forma orgánica se distribuye como complemento dietario.

El Se en forma de selenomethionina y de selenocystathionina se acumula en concentraciones muy altas en las semillas o nueces de los árboles de la familia Lecythidasae [3]. Específicamente en *Lecythis minor* en el departamento del Magdalena (Colombia), se encontraron concentraciones de Se entre 0.4% a 0.7% [4]. Estas semillas son descascaradas manualmente para obtener las nueces de las cuales se extrae por compresión en frío, aceite y una torta con alto contenido de Se. El proceso manual de descascarado es lento y tedioso convirtiéndose en un cuello de botella en el proceso de producción de materia prima para la fabricación de complementos dietarios para uso humano y animal. En Colombia se exporta materia prima para la extracción de Se tomada del fruto del árbol de *Lecythis minor*, conocido en la Costa Norte con los nombres comunes de olleto y olla de mono, cuyo fruto puede contener de 10 a 16 semillas. Las empresas nacionales que comercializan el producto utilizan procesos manuales para extraer la semilla del interior de la cáscara usando cascanueces. Diseños de máquinas semiautomáticas han sido reportados [5-8] pero la mayoría no tiene la versatilidad para procesar diferentes tamaños de nueces. Más recientemente, un diseño propuesto por [9] permite el rompimiento de nueces de diferente tamaño utilizando una barra curvada que varía su separación de un rodillo o tambor giratorio; pero este diseño es más orientado a nueces pacanas (pecans) y nogales (walnuts), y [9] no especifica forma ni dimensiones detalladas de los elementos en contacto con la nuez.

La necesidad de aumentar la eficacia en el proceso de quebrado de la cáscara para extracción de la nuez *Lecythis minor* da origen a este trabajo, solicitado por una empresa dedicada a la recolección, extracción y exportación de la nuez en Santa Marta, Magdalena (Colombia). Se presenta el desarrollo de una máquina para romper la cáscara de la nuez *Lecythis minor* y extraer su semilla. Se consideran cuatro alternativas de mecanismo para fracturar la cáscara, con base en modelos existentes de operación manual utilizados por una empresa dedicada a la exportación de la nuez. La evaluación de las alternativas se basa en metodología de diseño conceptual conllevando a un diseño que permite, como principal diferencia con las máquinas existentes, la capacidad de romper nueces de tamaño variable de manera continua. La integridad estructural de los principales elementos es verificada mediante formulación de teoría de falla y simulaciones de elemento finito con SolidWorks.

Metodología

Selección del Prototipo

En la etapa de diseño conceptual se visualizan las posibles variantes u opciones para el desarrollo de la máquina para descascarar nueces [10]; los requerimientos son los siguientes: -El diseño debe generar una máquina capaz de romper la cáscara de la nuez más eficientemente que en el proceso manual. -Debido a que la materia prima que se maneja tiene como finalidad el consumo humano, los materiales seleccionados deben cumplir con los requerimientos de sanidad. -La máquina fabricada debe realizar el proceso de rompimiento de la cáscara de la nuez de forma semiautomática. -El diseño de la máquina debe poder ajustarse a diferentes tamaños de nueces, teniendo en cuenta que es imposible un mismo tamaño de nuez. -La alimentación de la maquinaria



y la recolección del material luego de realizar el quiebre de la nuez debe realizarse de forma manual. -El proceso de romper la cáscara de las nueces debe realizarse sin la intervención humana.

Para la generación del concepto la base es el rompimiento de la cáscara de nueces de diferentes tamaños y de manera más eficiente que utilizando máquina manual. Se generaron cuatro conceptos que se detallan a continuación.

Diseño conceptual uno: Mecanismo biela-manivela. Las nueces son colocadas en un agujero en el piso y de ahí son alimentadas mediante una banda con cangilones que entrega las nueces sobre una tolva, que tiene una inclinación adecuada para permitir que las nueces caigan por acción de la gravedad al espacio entre una placa fija y una placa móvil que es controlada por un mecanismo de biela-manivela en donde el impacto de la biela permite quebrar la cáscara de las nueces, en una secuencia como la mostrada en la Figura 1. La Tabla 1 resume los mecanismos propuestos como parte del primer diseño conceptual.



Figura 1. Secuencia de mecanismo biela-manivela del diseño uno. (Fuente: Autores)

Tabla 1. Mecanismos requeridos y solución propuesta para diseños conceptuales

Mecanismo	Diseño Uno	Diseño Dos	Diseño Tres	Diseño Cuatro
Alimentación	Banda con cangilones	Banda inclinada	Manual	Manual
Distribución	Relación de transmisión de banda	Manual	Cilindro hidráulico	Gravedad + geometría del diseño
Quebramiento de cáscara	Biela manivela + placa	Placa + levas	Cilindro hidráulico + Placa	Placa + rodillo
Desalojo de nueces y cáscara	Gravedad	Gravedad	Cilindro hidráulico	Gravedad + geometría del diseño
Recolección de nueces	Banda con cangilones	Banda	Banda	Gravedad + geometría del diseño

Diseño conceptual dos: Accionamiento por levas. Las nueces son ubicadas sobre una banda inclinada que las arroja dentro de una tolva, la distribución de las mismas depende únicamente de la frecuencia con la cual un operario alimentaría la banda, es decir, el ritmo de trabajo de la persona es una variable para la productividad del proceso. Los grupos de nueces ingresan a la zona de acción de una leva que las comprime contra placas fijas, las cuales tienen una separación regulable de manera que se puedan ajustar para diferentes grupos de tamaños. La Tabla 1 resume los mecanismos propuestos como parte del segundo diseño conceptual. El proceso de quebrado de las nueces se llevaría a cabo de acuerdo con lo presentado en la secuencia de la Figura 2.

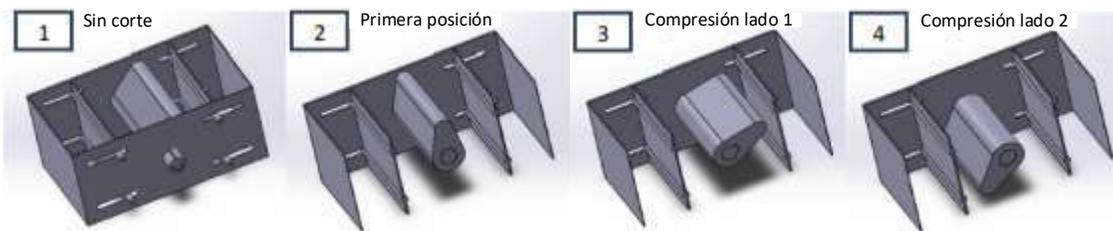


Figura 2. Esquema y secuencia del mecanismo de leva del diseño conceptual dos. (Fuente: Autores)



Diseño conceptual tres: Quebrado por cilindro hidráulico. La secuencia del proceso se ilustra en la Figura 3. Un grupo de nueces es ubicado sobre un espacio definido de la máquina, luego, por acción de un cilindro, las nueces son acomodadas en la zona de acción de otro cilindro, el cual se encarga de comprimirlas y quebrar su cáscara. Posteriormente, un tercer cilindro se encarga de trasladar las nueces con la cáscara quebrada a un sistema de banda que culmina en un silo de almacenamiento. La Tabla 1 resume los mecanismos propuestos como parte del tercer diseño conceptual.

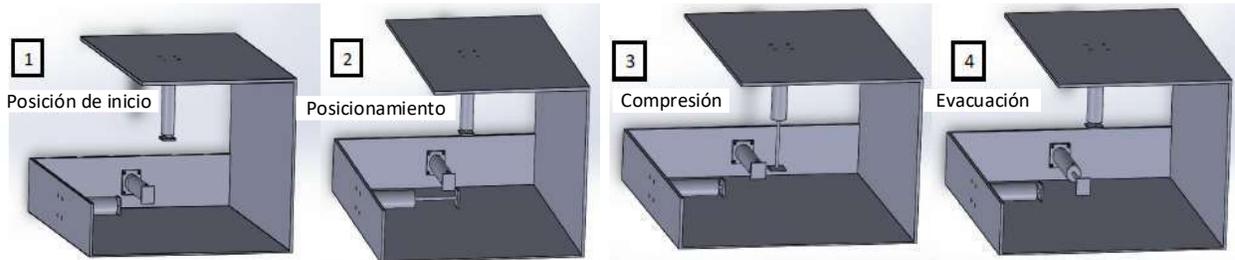


Figura 3. Esquema y secuencia de los cilindros del diseño conceptual tres. (Fuente: Autores)

Diseño conceptual cuatro: Quebrado por rodillo dentado. En esta propuesta, ver secuencia en la Figura 4, las nueces son arrojadas manualmente sobre una tolva que las conduce a la zona donde son quebradas por el conjunto de un rodillo dentado junto a una placa móvil. Se romperán las nueces que se alineen en los valles del rodillo y el objetivo por el cual hay una placa móvil es permitir el procesamiento de nueces de diferentes tamaños fijándola a diferentes distancias del rodillo. La Tabla 1 resume los mecanismos propuestos como parte del cuarto diseño conceptual.

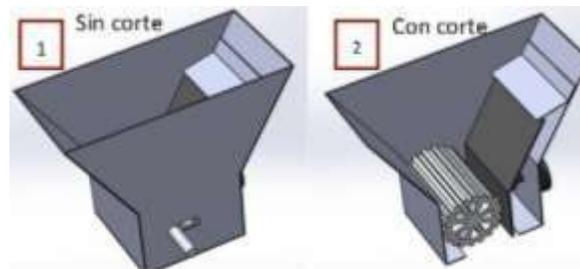


Figura 4. Esquema del rodillo del diseño conceptual cuatro. (Fuente: Autores)

Selección del concepto

La principal motivación para el diseño es el rompimiento de la cáscara de las nueces mediante un mecanismo que no involucre la aplicación manual de fuerza. Este es el aspecto de mayor importancia, inclusive por encima del mecanismo de alimentación. Se desea un mecanismo versátil, sencillo y que funcione de manera eficiente; por esto se selecciona el conjunto rodillo dentado y placa móvil. Así mismo, los mecanismos para la distribución y evacuación de material deben ser sencillos, de manera que el diseño sea enfocado a la tarea de romper las nueces. Se decide aprovechar el efecto de la gravedad combinado con la geometría de la máquina para que las nueces sean distribuidas y evacuadas sin requerir de un actuador que incremente el consumo de potencia. También es necesario definir un mecanismo que permita el movimiento de la placa, para lo cual existen dos propuestas explicadas a continuación.

Movimiento de la placa mediante tornillo y engranajes. En este diseño se utiliza una modificación del conocido mecanismo sinfín-corona, debido a que en este diseño el movimiento debe ser “generado” en la corona y transmitido al sinfín; esto se hace por medio de un arreglo de



piñones sencillo, la implementación de un roscado en un extremo del eje como se muestra en la Figura 5 y el uso de una rosca que permita la transmisión del movimiento hacia la placa.

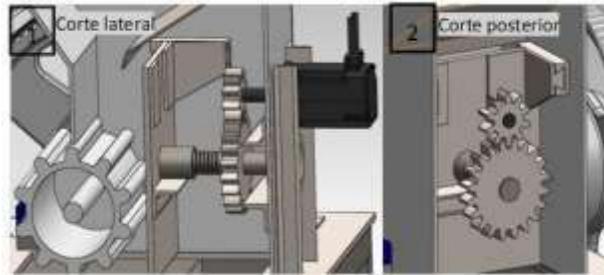


Figura 5. Placa con arreglo de tornillo sinfín. (Fuente: Autores)

Movimiento de la placa mediante piñón-cremallera. Se considera un elemento común para transformar movimiento rotacional en movimiento lineal que permita desplazar la placa. Por la configuración y la forma de accionar el mecanismo es evidentemente, más sencillo. La Figura 6 ilustra el arreglo planteado para este diseño.

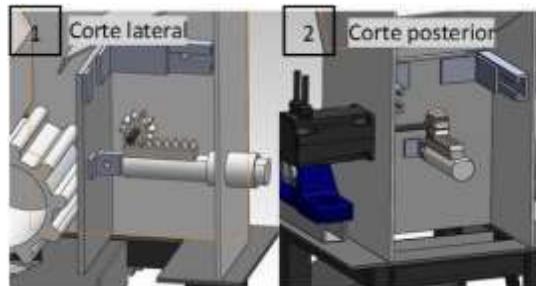


Figura 6. Placa con arreglo piñón-cremallera. (Fuente: Autores)

La Tabla 2 presenta la evaluación de conveniencia de las dos opciones para movimiento de la placa, utilizando la ponderación de algunos criterios básicos, con calificación asignada fluctuando entre 1 para la calificación más baja, y 5 para la más alta. El mecanismo que permite regular el espacio disponible para realizar la ruptura de la nuez es el arreglo de tornillo sinfín. Su configuración particular permite el impacto de fuerzas en la dirección del eje del tornillo sin resultar en desajustes o cambio de posición de la placa misma, lo cual descarta de inmediato al arreglo piñón-corredera.

Tabla 2. Ponderación de mecanismos para posicionar la placa

	Tornillo sinfín	Piñón-corredera
Amortiguamiento	5	1
Funcionalidad	5	5
Economía	3	5
Construcción	2	3
Mantenimiento	2	2

Materiales

La legislación Colombiana en la resolución 683 [11] reglamenta los requisitos sanitarios que deben cumplir los materiales, objetos, envases y equipamientos destinados a entrar en contacto con alimentos y bebidas para el consumo humano: En su capítulo II, artículo 13, establece requisitos para fabricación de materiales, objetos, envases y equipamientos a entrar en contacto con alimentos y bebidas, y los mismos deben estar en las listas positivas sean de la FDA (*Food and Drug*



Administration) de los Estados Unidos; o su equivalente de la Comunidad Europea, o en su defecto Mercosur [12]. En general, los materiales en contacto con alimentos no deben ceder contribuyentes como metales, sustancias orgánicas, plastificantes, pigmentos o estabilizantes, al igual que solventes o sustancias que atenten contra la salud pública. Se escoge el acero inoxidable y sus aleaciones como material, dado que su composición química tiene la capacidad de crear una película pasivante estable en la superficie, continua, delgada y químicamente inerte [13]. Para las piezas que no están en contacto con la nuez, el acero estructural A36 es escogido.

Diseño Detallado

El diseño realizado está sustentado en cálculos y análisis de ingeniería apoyados en herramientas computacionales para la toma de decisiones en la selección de componentes, accesorios y materiales de catálogos de productos comercializables.

Diseño del rodillo dentado. Se decidió el rodillo dentado como elemento en contacto con la nuez, el cual debe cumplir con diferentes características: permitir romper varias nueces al mismo tiempo, arrastrar las nueces para ser quebradas sin permitir su deslizamiento, resistir los esfuerzos generados al romper la nuez, rotar manteniendo un momento de inercia bajo, y el material del que esté conformado debe cumplir con el grado sanitario para el proceso. En la Figura 7 se muestra el esquema del rodillo dentado. Para determinar las dimensiones del rodillo, se deben establecer las dimensiones de la nuez. Esta posee una forma alargada y ovoide con una cáscara dura y difícil de quebrar sin la ayuda de algún elemento de transmisión de fuerza. Posee mayor resistencia cuando se trata de romper axialmente tal como cuando se intenta romper un huevo comprimiendo sus polos. Para determinar el tamaño de las nueces, se realizaron mediciones a la muestra de 25 nueces antes de someterlas al ensayo de compresión. Dicho rango está dado por una medida de longitud entre los 18 y 25mm y un diámetro aproximado entre 13 y 18mm, como se ilustra en la Figura 8.a. De acuerdo con el ensayo reportado en [14], la fuerza máxima para romper la nuez es de 210 N, y será la fuerza de trabajo a considerar para cálculos. Para permitir la ruptura simultánea de varias nueces se propone una longitud de rodillo que permita alinear hasta 5 nueces en cada uno de sus valles, obteniendo idealmente hasta el procesamiento de 50 nueces por cada revolución. Así mismo, el perfil del diente, que en realidad consiste en un cuerpo trapezoidal con un semicírculo como cabeza, está concebido de manera que pueda arrastrar las nueces con diámetros dentro del rango obtenido en las mediciones (Figura 8.b). Se consideró un rodillo hueco para reducir el momento de inercia y disminuir la potencia requerida. Se elige el acero inoxidable 316L como el material que debe ser usado para la fabricación de las piezas en contacto con las nueces.

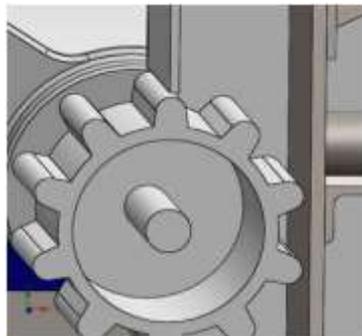


Figura 7. Geometría general del rodillo dentado. (Fuente: Autores)

La forma en que serán quebradas las nueces se muestra en la Figura 9, con la acción de la fuerza de rompimiento F_N generada al presionar la nuez contra la placa. Simplificando la geometría del



rodillo, se realiza su diagrama de cuerpo libre (DCL), Figura 10, donde A_x , A_z , B_x y B_z son las cargas de reacción en los apoyos A y B; T_A y T_B son los torques en los mismos apoyos; T_{in} es el torque suministrado por el motor; F_P es la carga de la polea; W_T es la carga debido al peso del rodillo; T_N es el torque debido a la fuerza de rompimiento F_N ; N_x y N_z son las componentes de la misma fuerza de rompimiento de la nuez. El diagrama de fuerza cortante y momento flector del rodillo se presenta en la Figura 11.a para el eje x, y para el eje z en la Figura 11.b. Se combinan en la ecuación (1) los esfuerzos debido al cortante, τ_v , y el efecto de los torsores τ_{xz} , para obtener el cortante total τ_T [15]. Para un ángulo $\theta_N=45^\circ$ y considerando que se parten 5 nueces en cada valle del rodillo (50 nueces por revolución) se obtiene, Figura 9, $N_x=N_z=742N$. A partir del análisis de cargas del rodillo en la Figura 9, se tendrá $A_x=491,2N$, $B_x=352N$, $B_z=-320,66N$, $A_z=159,66N$. El valor del torque del rodillo, T_N , se calcula con la ecuación (2), donde $r=42mm$.

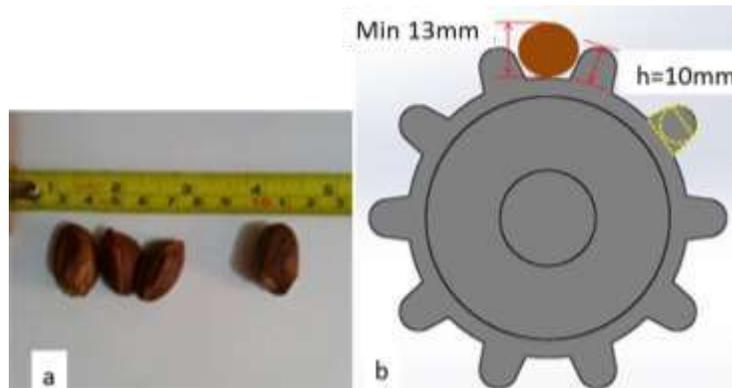


Figura 8. Dimensiones de la nuez (a), y del perfil del rodillo (b). (Fuente: Autores)

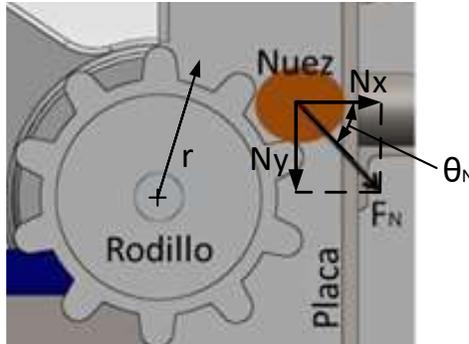


Figura 9. Disposición de la nuez entre rodillo y placa para generar la fuerza de rompimiento F_N . (Fuente: Autores)

$$\tau_T = \tau_{xz} + \tau_v \quad (1)$$

$$T_N = 5F_N r \quad (2)$$

El esfuerzo equivalente, σ_{eq} , se obtiene de la ecuación (3) al combinar el cortante total τ_T con el axial σ_T [15]. El esfuerzo de torsión en el punto crítico para el rodillo es $\tau_{xz}=14,5$ MPa. Los esfuerzos axiales debido al flector son $\sigma_z=16,96$ MPa y $\sigma_x=19,2$ MPa. Para el acero inoxidable 316L se tiene $S_{ut}=520MPa$ y $S_y=240MPa$ [15]. El límite de resistencia a la fatiga, S_e , se calcula para el acero 316L mediante la ecuación (4) donde los factores k_a a k_f son para este caso [15]: factor de superficie $k_a=0,86$, factor de modificación del tamaño $k_b=0,88$, factor de carga $k_c=1$, factor para



la temperatura $k_d=1$, factor de confiabilidad $k_e=0,868$ para una confiabilidad de 95%, factor de efectos misceláneos $k_f=0,3$ considerando algunos efectos dados por la combinación eje-rodillo.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_T^2 + 3\tau_T^2} \quad (3)$$

$$S_e = 0,5S_{ut}k_a k_b k_c k_d k_e k_f \quad (4)$$

Considerando el punto de unión por soldadura del eje con el rodillo, los factores de seguridad obtenidos para fatiga con los esfuerzos arriba calculados son Goodman modificado $n=3,3$, Gerber $n=3,6$ y ASME-Elíptica $n=3,5$ [15]. La simulación de análisis de elemento finito con SolidWorks arrojó un factor de seguridad para falla por fatiga de 2,12, Figura 12.a, aceptable para el caso. La diferencia se explica en la manera como se considera la concentración de esfuerzos en el software. Sin embargo, dada las consideraciones en la selección de la carga, este factor de seguridad es aceptable. La simulación también mostró que los otros elementos de la máquina no fallarán por fatiga ni carga estática.

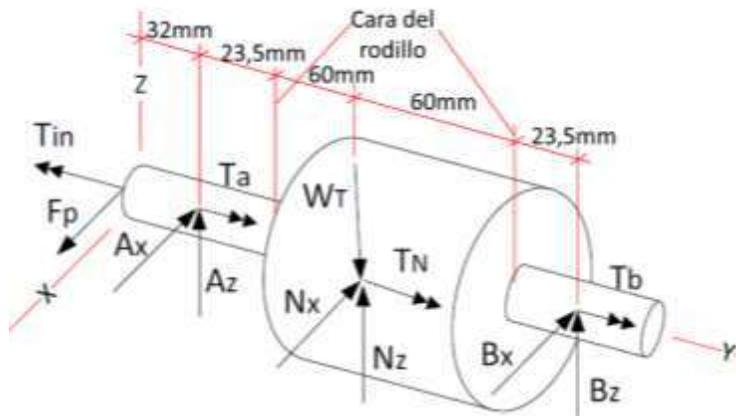
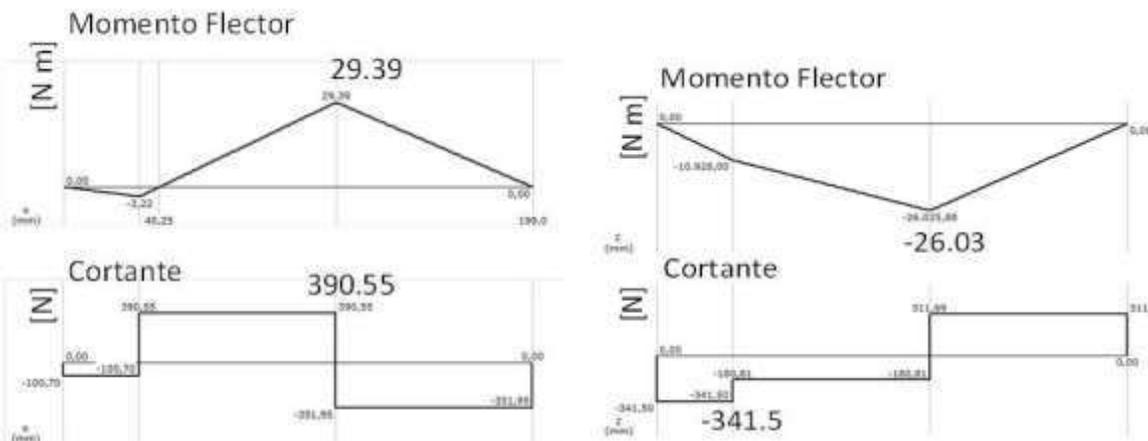


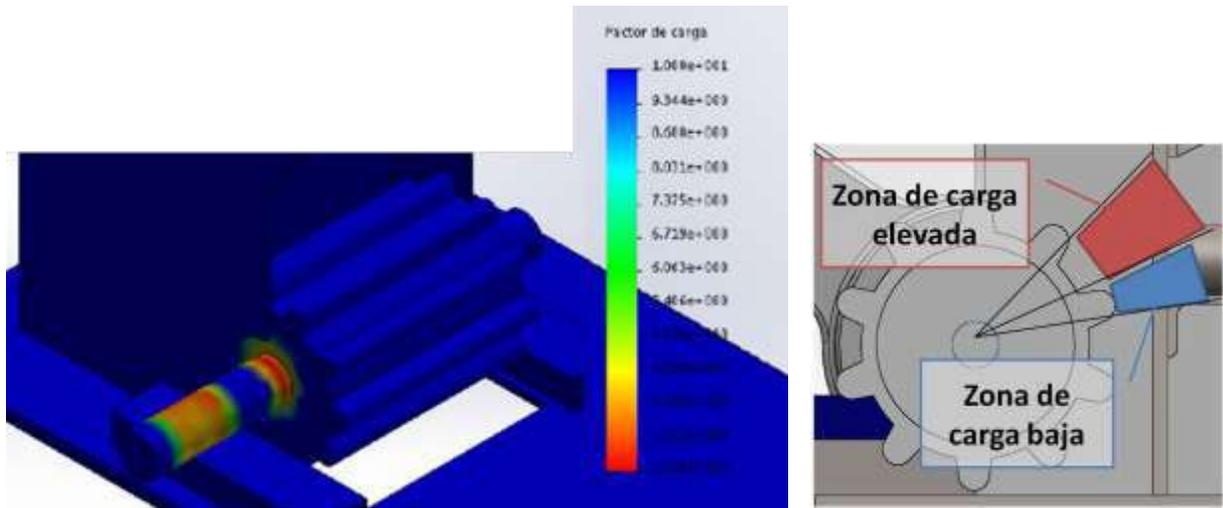
Figura 10. Diagrama de cuerpo libre del rodillo dentado. (Fuente: Autores)



a. Fuerza cortante y momento flector, eje x b. Fuerza cortante y momento flector, eje z
Figura 11. Diagramas de cortante y momento del rodillo dentado. (Fuente: Autores)

Selección de motor y transmisión. Debido a la geometría del rodillo (véase la Figura 12.b) el régimen de trabajo del motor no será continuo. Habrán baches pequeños que conllevarán a un

comportamiento de picos y valles continuos de corriente, es decir con carga intermitente, clasificación S6 para motores eléctricos [16], con una secuencia de ciclos de régimen idénticos con período de funcionamiento a carga constante seguido de uno en vacío, sin período de reposo. Los períodos en vacío corresponden a los momentos en que un pico del rodillo pasa cerca de la placa. El largo del rodillo permite posicionar hasta 5 nueces por cada canal, por lo que el par de trabajo mínimo, T_c está dado por la ecuación (2); se obtuvo un torque de 44,5N·m, considerado par elevado. El rodillo tiene 10 canales para rompimiento, lo cual permitiría romper hasta 50 nueces por revolución, alta exigencia por lo cual se requiere un motor con un número de polos alto y comercialmente disponible para generar mayor par. Se elige un motor de 6 polos que gire a 1200rpm.



a. FEA para fatiga, mostrando valor más bajo de factor de seguridad en el punto de unión del eje con el rodillo, la escala varía de 2,3 a 1000.

b. Zonas de carga en giro del rodillo.

Figura 12. Simulación y zonas de carga del rodillo. (Fuente: Autores)

Para transmitir el movimiento se escoge una transmisión de pnea trapezoidal, dispuesta como se ilustra en la Figura 13, elegible en casos de elevado torque. La selección de las poleas se hace con asistencia del software BeltCalc de SKF [17], con un factor de servicio, F_s , final de 1,16, y una relación de transmisión de 5:1, para una velocidad de rotación del rodillo, ω_w , de 240rpm, y permite calcular la potencia nominal para la rotación del rodillo, P_w , dada por la ecuación (5) y establecer que se necesita una potencia de 1,2kW para mover el rodillo en régimen de trabajo.

$$P_w = T_c \omega_w \quad (5)$$

Se puede calcular ahora la potencia del motor, P_M , teniendo en cuenta el factor de servicio F_s y la eficiencia de la transmisión, η , mediante el uso de la ecuación (6) requiriendo una potencia mínima del motor de 1,54kW, después de asumir una eficiencia para la transmisión por pnea de 0,9 [18]. Un motor con estas características combinado con los mecanismos propuestos para la máquina podría romper de manera ideal hasta 5000 nueces por minuto, considerando conservativamente una reducción de producción de la máquina de hasta el 50% por efectos diversos no considerados aún.

$$P_M = \frac{P_w F_s}{\eta} \quad (6)$$

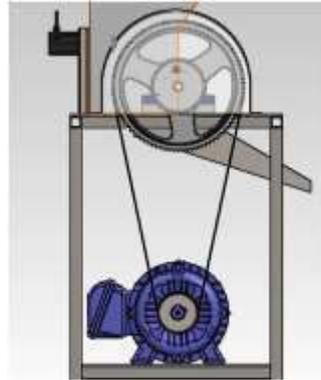


Figura 13. Esquema de transmisión por polea trapezoidal. (Fuente: Autores)

Mecanismo de placa móvil. La placa contra la cual es presionada la nuez para su rompimiento se posiciona de acuerdo con el tamaño de la nuez, mediante el tornillo con engranajes mostrado en la Figura 5. Esta placa recibirá intermitentemente la acción de fuerzas que podrían desajustar la posición en la que se ubica dicha placa, es por esto que se selecciona un perfil de rosca tipo ACME con inclinación del filete de $14,5^\circ$ y diámetro del tornillo de $5/8''$ que no fallará ante la acción de la componente axial de la fuerza de rompimiento. Esta combinación resulta un tornillo autoasegurante con coeficiente de fricción de 0,15 que no se desajuste por el efecto de las cargas intermitentes. La Figura 14 presenta, finalmente, un modelo CAD completo de la máquina propuesta, con el rótulo de las principales secciones. En total la máquina se compone de cerca de 30 piezas construidas por separado y ensamblada mediante juntas de tornillos.

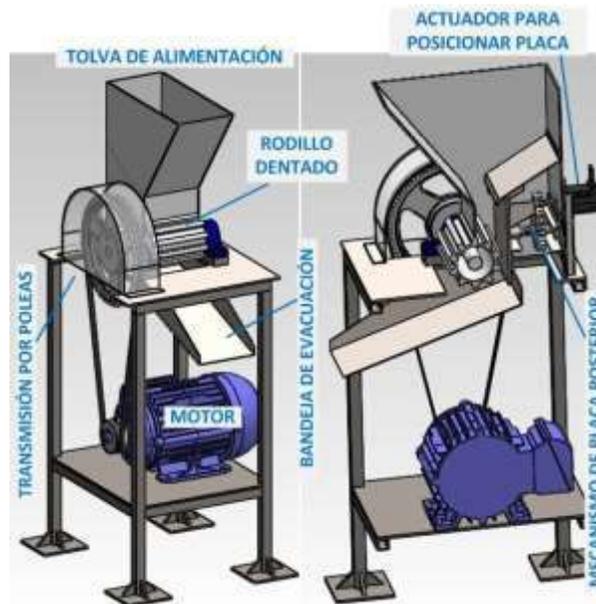


Figura 14. Modelo CAD de la máquina propuesta. (Fuente: Autores)

Conclusión

En el diseño presentado de la máquina rompedora de cáscaras de nueces *Lecythis minor* se tuvieron en cuenta varias opciones para controlar el impacto generador del quebramiento: mecanismo biela-manivela, cilindro hidráulico, y un mecanismo de leva que permitiera alternadamente la alimentación y rompimiento; escogiendo la opción de rodillo dentado. La robustez de este elemento



permitía una deflexión en el rango elástico al tiempo que se podría procesar una mayor cantidad de nueces. El dimensionamiento del rodillo dentado se hizo con base en dos aspectos básicos: el tamaño de la nuez con cáscara y su resistencia. El diámetro promedio de la nuez con la cáscara es de 15mm, valor usado para generar un perfil de diente recto trapezoidal con cresta redondeada que permita el deslizamiento de las nueces hacia el interior del valle del diente.

Este estudio es una contribución desde la Academia para mejorar las condiciones de trabajo de una empresa dedicada a la exportación de *Lecythis minor*. Para una potencial implementación de la máquina desarrollada es recomendable la inserción de un acople flexible entre el eje del motor y el eje de entrada al sistema de transmisión por poleas, de manera que sirva como fusible mecánico en caso de trabamiento en el proceso. Antes de la implementación, es aconsejable la construcción de un prototipo preliminar que permita verificar de una manera experimental el efecto de la curvatura de la cresta de los dientes del rodillo, y el tamaño de estos en el flujo de nueces durante la operación. Como trabajo futuro también se propone un sistema de visión para determinar el tamaño efectivo del lote de nueces y posicionar adecuadamente la placa, complementado con un actuador automatizado para facilitar el posicionamiento.

Referencias

- [1] L. Clark, et al. "Effects of Selenium supplementation for cancer prevention in patients with carcinoma of the skin", The Journal of the American Medical Association, vol. 276, no. 24, pp. 1957-1963, 1996.
- [2] R. Mckenzie, "Selenium and the immune system", in Nutrition and Immune Function, P. Calder, P. Field, and H. Gill, CABI Publishing, 2002, pp. 229-250.
- [3] S. Mori, and G. Prance. Flora Neotropica. New York: The New York Botanical Garden, 1990.
- [4] J. Lafont, E. Calle, y L. Durango, "Composición química del aceite de almendras producidas por el árbol Olleto (*Lecythis minor* DC), Revista Información Tecnológica, vol. 24, no. 1, pp. 59-68, 2013.
- [5] USPTO. Power-operated nut cracker having knives for cracking or splitting end of nuts. Inventores: Judson S. Swearingen; John R. Barton. Int. CL.: 146-10. Application date: 5, October, 1951. USA, patent of invention. US2690196. 28, September, 1954.
- [6] USPTO. Nut cracker. Inventores: Judson S. Swearingen; John R. Barton; Richard Mollison. Int. CL.: A47j 43/04. Application date: 5, January, 1967. USA, patent of invention. US3422865. 21, January, 1969.
- [7] USPTO. Electric powered nut cracker. Inventores: George H. Burdette; George Spector. Int. CL.: A23N 5/00. Application date: 11, August, 1988. USA, patent of invention. US4848220. 18, July, 1989.
- [8] USPTO. Nut cracking machine. Inventores: Wilfred C. Frederiksen; Sun Y. Kim. Int. CL.: A23N 5/00. Application date: 8, May, 1992. USA, patent of invention. US005247879. 28, September, 1993.
- [9] USPTO. Nut cracking mechanism for variable-sized nuts. Inventor: Sun Y. Kim. Int. CL.: A23N 5/00. Application date: 16, August, 2005. USA, patent of invention. US7717033 B1. 18, May, 2010.



- [10] M. French. *Conceptual Design for Engineers*, 3rd. ed. New York: Springer, 1998.
- [11] Colombia, Ministerio de Salud y Protección Social, Resolución 683 (Marzo 28 de 2012), “Por medio de la cual se expide el Reglamento Técnico sobre los requisitos sanitarios que deben cumplir los materiales, objetos, envases y equipamientos destinados a entrar en contacto con alimentos y bebidas para consumo humano,” [En línea]. Disponible En: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=46773> [Citado 14/08/2018].
- [12] Mercosur, Grupo Mercado Común, “Res. N° 27 de 1993: Envases y equipamientos metálicos en contacto con alimentos,” [En línea]. Disponible En: <http://www.mercosur.int/innovaportal/v/3099/2/innova.front/resoluciones-1993> [Citado 14/08/2018].
- [13] W. Callister, and D. Rethwisch. *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach*, 4th. ed. New York: Wiley, 2012.
- [14] C. Porto Romero y F. Bolívar Ortega. “Diseño de una máquina descascaradora de nueces medicinales para la obtención de selenio”. Proyecto de Grado, Ingeniería Mecánica. Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia, 2015.
- [15] R. Budynas, y J. K. Nisbett. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. 8va. ed. México: McGraw-Hill Interamericana, 2008.
- [16] WEG Motors, Guía de Especificación de Motores Eléctricos. Noviembre de 2012. [documento en línea]. <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacion-50039910-manual-espanol.pdf>> 68 p. [consulta: 08-15-2018].
- [17] SKF BeltCalc, Belt Calculator version 2.1.0. [Online]. <<http://www.skf.com/group/knowledge-centre/engineering-tools/skfbeltcalculator.html>> [Citado: 14-08-2018].
- [18] SKF, Correas. Incremento de la eficiencia energética con correas XP y sincrónicas en aplicaciones de ventiladores. [En línea]. Disponible en: <http://www.skflam.com/LAM/enews/enlace_3-12/es/ptImprimir.html> [Citado: 14-08-2018].



Diseño de Mecanismo Adaptable para Robot de Inspección Interna de Tuberías

Design of Adaptable Mechanism for Internal Pipe Inspection Robot

Ana Rocío Córdoba Malaver^{1,γ}, Eduardo Castillo Castañeda¹

Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Instituto Politécnico Nacional, Querétaro, México

γ. Autor correspondiente: anarcordobam@gmail.com

Resumen

Este documento presenta la selección de concepto y Diseño Asistido por Computadora (CAD) de un mecanismo adaptable para robot de inspección interna de tuberías. Es un prototipo modular electromecánico que se ajusta al diámetro de la cavidad por la cual se desplaza, mecanismo que comprende cuatro extremidades por cada sección -distribuidas radialmente y de forma equidistante entre sí-, que se extienden y retraen por medio de elementos mecánicos realizando un movimiento tipo bisagra, cada extremidad cuenta con una rueda en su extremo como medio de desplazamiento. Donde una de las secciones está compuesta por dos extremidades que poseen motores para la generación del movimiento a través de la tubería. La locomoción está pensada en desplazamientos dentro de tuberías tanto horizontales como verticales. Adicionalmente, cuenta con una articulación flexible entre secciones, que le permite ajustarse a los cambios de dirección en la tubería como lo son los codos de 90° y tes.

Palabras clave: Inspección de tubería, Robot adaptable, Robot de inspección.

Abstract

This document presents the selection of concepts and Computer Aided Design (CAD) of an adaptable mechanism for internal pipe inspection robot. This is an electromechanical modular prototype that adjusts to the diameter of the cavity through which it moves, this is a mechanism that comprises four extremities for each section -distributed radially and equidistant from each other-, which extend and retract by means of mechanical elements performing a hinge-like movement, each extremity has a wheel at its end as mean of movement. Where one of the sections is composed of two extremities that have motors for generating movement through the pipeline. The locomotion is thought of displacements within both horizontal and vertical pipes. Additionally, it has a flexible articulation between sections, which allows changes in the direction of the pipeline as 90° elbows and tees.

Keywords: Pipe inspection, Adaptive robot, Inspection robot.

Introducción

La Robótica de servicio está abarcando diversos campos de acción con el fin de ayudar al ser humano a realizar sus tareas diarias, en especial aquellas que son: repetitivas, peligrosas, que requieren grandes esfuerzos o simplemente no las puede realizar un ser humano. Tareas como:



limpieza, asistencia médica, rehabilitación, inspección, clasificación, levantamiento de grandes cargas, entre otras.

Entre las tareas que no puede realizar el ser humano se encuentra la inspección de tuberías, en especial la inspección interna de éstas, ya que son lugares bastante estrechos a los cuales el hombre no puede llegar y se requieren de actividades de inspección, mantenimiento y reparación, tal y como se muestra en la Figura 1. Para ello, la robótica ha puesto al servicio dispositivos y robots que han venido encargándose de esta actividad, siendo los robots móviles la opción más llamativa [1].

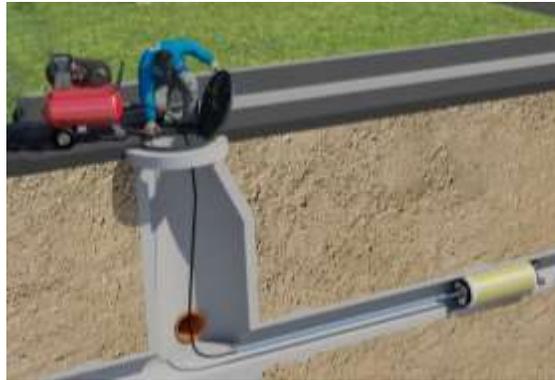


Figura 1. Sistema Packer de rehabilitación. GCcam. Available: <http://inspecciondetuberiasconcamara.com/rehabilitacion-de-tuberias/>

Los robots de inspección poseen diferentes clases de estructuras y mecanismos de desplazamiento o locomoción, entre los cuales se destacan: los “pig”, los “crawler”, los “screw”, los “wall press”, los “dron”, de ruedas, caminadores y los híbridos. Siendo de gran importancia definir el diseño del robot de inspección, de acuerdo con las necesidades que se tienen [2][3]. Para ello, se identifica la necesidad o aplicación que se quiere abordar definiendo las especificaciones de diseño del robot a crear. De acuerdo con esto, se define el concepto del robot que cumpla con dichas especificaciones, luego se identifican los materiales y elementos que lo compondrán y se diseña el robot según aspectos definidos optimizando los recursos.

En el campo de los robots de inspección interna de tuberías, se requiere de robots con mecanismos capaces de adaptarse a los cambios de diámetro y dirección que puedan encontrarse en la red de tubería, así como robots que sean capaces de desplazarse por tuberías tanto verticales como horizontales, permitiendo así una adaptabilidad a la estructura de la red a inspeccionar.

En la actualidad, existe gran variedad en el diseño y desempeño de los equipos de inspección disponibles tanto a nivel comercial como invenciones patentadas o desarrollos tecnológicos en diversas instituciones, que se ajustan a la necesidad del usuario en específico; sin embargo, no todas son aptas para las diversas labores de inspección y su desempeño varía de acuerdo al medio al que vaya ser sometido, lo que implica poseer más de un equipo de inspección de acuerdo a la situación o, contratar una empresa que tenga a disposición del cliente equipos diversos de inspección de tubería. Por ello, el diseño de nuevos y multifuncionales dispositivos continúa generándose de modo que su desempeño y adaptabilidad sea cada vez mayor.



Se han venido desarrollando prototipos con tipos de locomoción capaz de desplazarse en superficies verticales -situación de mayor complejidad en inspección de tubería- para los cuales, según las condiciones de diseño, se han definido diferentes estrategias y configuraciones que resuelven problemas específicos [4]. Ejemplo de ello es el robot diseñado por Chen Jun y Chen Tao en 2011, es un robot para inspección de tuberías de tipo modular el cual puede inspeccionar tuberías con diámetro mínimo de 29.7 cm, este robot cuenta con 4 o más unidades y puede desplazarse por tuberías con cambios de dirección de hasta 90°, sin embargo, no está diseñado para adaptarse a diámetros cambiantes en la tubería [5]. Dicho robot se puede observar en la Figura 2.

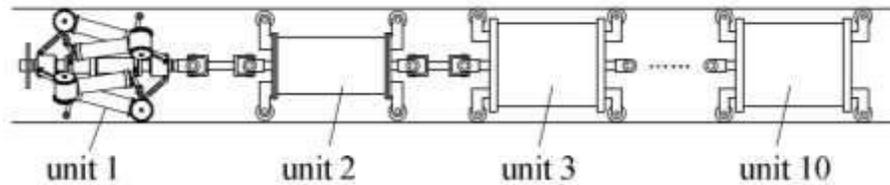


Figura 2. Esquemas de composición del sistema de inspección de robots en tubería [5].

Otro de los diseños representativos en este campo, es el robot de inspección interna de tuberías propuesto por D. Lee et al. en 2012 visualizado en la Figura 3, que consta de un módulo, con cuatro pares de ruedas que cambian su orientación, a su vez rotan sobre su eje y sus ramificaciones se abren y cierran acoplándose a diferentes diámetros de tubería gracias a un sistema de adaptabilidad basado en resortes de tensión. Posee 5 actuadores y tiene un peso de 3.6 Kg, siendo su complejidad de fabricación bastante elevada. Su máxima velocidad alcanzada es de 380 cm/min y puede desplazarse por tuberías tanto verticales como horizontales [6].



Figura 3. The prototype of the in-pipe robot [6].

Entre los diseños más actuales de robot de inspección, se encuentra el de D. Chablat et al. (2018), el cual se basa en el diseño optimizado de un robot para inspección de tuberías, que centra su sistema de locomoción en un desplazamiento tipo gusano, el cual está diseñado para desplazarse por tuberías de diámetros pequeños comprendidos entre los 2.7 cm y 3.7 cm. Gracias a su estructura logra realizar giros de 90° en el interior de la tubería. Pesa aproximadamente 0.657 Kg y posee tres motores con los cuales realiza el movimiento que permite su desplazamiento.



Figura 4. Sistema robótico en el interior de la tubería [7].

Tal y como se puede observar, los diseños han venido evolucionando a medida que los requerimientos de las labores de inspección lo ameritan. Por lo tanto, se parte de este principio para elaborar un nuevo diseño de robot de inspección capaz de sobrellevar las dificultades que se tienen en ese campo.

Metodología

La metodología empleada para el desarrollo del robot está basada en una metodología de desarrollo tecnológico [8], que consta de cinco fases: Estudio, Diseño, Selección de materiales y dispositivos, Construcción y, Evaluación y análisis de funcionamiento del robot. Cada una de las fases comprende actividades específicas. Sin embargo, en este artículo sólo se tratará la fase de diseño. En esta fase se tiene en cuenta cada una de las especificaciones o características que debe tener el robot para que logre realizar las tareas que se requiere.

Por lo tanto, inicialmente se definen las especificaciones de diseño bajo las cuales se desarrollará el concepto de robot, para luego por medio de alguno de los métodos de selección de concepto -el que más se adecue a las necesidades que se tienen-, se defina el concepto a desarrollar. Seguido a esto, se diseña las partes mecánicas y el dispositivo en general; visualizando la movilidad que requiere éste para un desempeño adecuado.

Definición de especificaciones de diseño

En la actualidad existen diversas clases de robots que recorren internamente tramos de tubería, pero en su mayoría no cuentan con características ya sea mecánicas, electrónicas o físicas que les permita realizar giros y ascensos por la tubería. Por lo tanto, a pesar de la gran variedad de prototipos existentes no se ha logrado enfocar sus desarrollos en equipos que sean capaces de abordar todos o la mayoría de los obstáculos o adversidades que pueda presentarse en dicho medio.

Las especificaciones para el diseño del mecanismo se definieron del medio en el cual se desplazará el robot, y de las actividades que se quiere realice éste. La actividad principal para la cual se diseña el robot es: desplazarse en el interior de tuberías de Policloruro de Vinilo (PVC) en vacío, tanto horizontales como verticales, dicha tubería es cambiante en diámetro y dirección.

De esto, se derivan aspectos más específicos como: ser adaptable a cambios de diámetro de la tubería (diámetros entre 6" y 10"), que realice giros hasta de 90° para los cambios de dirección en tuberías (en codos o tes de 45° y 90°) y cuyo desplazamiento sea longitudinal al interior de la tubería. Siendo necesario identificar la estructura, configuración de componentes y elementos motrices adecuados para que el robot logre cumplir con las mencionadas características.



Selección de concepto

Uno de los aspectos más importantes en el diseño, es la selección del concepto. Para definir el diseño más adecuado para la aplicación en la que se desea se desempeñe el robot, se realiza una comparación entre las diversas estructuras, medios de desplazamiento, formas de locomoción y demás aspectos que se requieren para la conformación del robot de inspección.

La selección de la alternativa adecuada para el concepto del robot se recomienda ser realizada por medio de alguno de los métodos de selección que consta como mínimo de cuatro pasos fundamentales, que son: listar los conceptos a evaluar, elegir los criterios de selección, valorar el grado de cumplimiento de cada concepto respecto a cada criterio de selección y determinar el mejor concepto. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la mayoría de los métodos se basan en la intuición y experiencia del diseñador del producto [9].

De acuerdo con el estudio realizado por D. Justel et al. (2007), en su tabla comparativa de métodos de selección de conceptos (ver Tabla 1), clasifican los métodos estudiados en tres: métodos de baja, media y alta complejidad.

Tabla 1. Métodos de evaluación y selección de concepto.

MÉTODOS		MÉTODOS DE PUGH			AHP-Saaty (1978)	Pahl & Beitz (1984)	MÉTODOS DE QFD		Método de Fuzzy-Thurston & Carnahan (1992)
		Raing/weighthing (1976)	Convergencia controlada (1981)	Modificados Takai & Ishi (2004)			Harr et al. (1993)	Justel et al. (2006)	
PASOS									
	1)	Diseños conceptuales	X	X	X	X	X	X	X
Grado de novedad de los diseños								X	
Correlación diseños conceptuales							X		
2)	Criterios de evaluación	X	X	X	X	X	X	X	X
	Grado de importancia de los criterios (pesos)	X		X	X	X	X	X	X
	Criterio del coste mayor importancia			X					
	Definición de objetivos			X					X
	Parámetros de medida del criterio y unidades					X			
	El método obtiene los pesos de los criterios				X				
3)	Interrelación diseños Vs criterios	X	X	X	X	X	X	X	X
	Evaluación en referencia a objetos								
	Evaluación en parejas de concepto		X	X	X				
	Evaluación en referencia a funciones de valoración					X			
4)	Selección de concepto	X	X	X	X	X	X	X	X
	Variables de influencia							X	
	Optimización de concepto		X				X		



DIFICULTAD DE USO	BAJA	BAJA	BAJA/ MEDIA	BAJA	MEDIA	BAJA	MEDIA	ALTA
--------------------------	------	------	----------------	------	-------	------	-------	------

Por lo tanto, la selección del concepto de robot se ha realizado por medio de uno de los métodos de baja complejidad, como lo es el Método de Pugh de Convergencia Controlada, que consiste en realizar una comparativa entre las diferentes opciones de diseños que se tienen en la actualidad para cada aspecto por definir o concepto, frente a criterios de evaluación especificados. De modo que, por medio de cuadros comparativos se asigna valores ponderados a cada solución y al final se obtiene la solución más viable para esta aplicación, realizando sumatorias para cada opción de diseño [10].

Cualquiera de los métodos de selección de concepto de la Tabla 1 consta como mínimo de cuatro pasos o fases. El primer paso consiste en hacer una lista de los conceptos a evaluar; el segundo en elegir los criterios de selección; el tercero en valorar el grado de cumplimiento de cada concepto respecto de cada criterio de selección según lo proponen los autores del método, y finalmente, mediante un algoritmo de selección se determina el mejor concepto [9].

Para el diseño del robot de inspección se tuvo en cuenta tres conceptos: medios de desplazamiento -Tabla 2-, mecanismo para adaptabilidad al diámetro -Tabla 3-, generación de movimiento (desplazamiento) -Tabla 4-. Generando una tabla para cada uno de ellos empleando el Método de selección de conceptos de Pugh.

En la Tabla 2 se presentan los medios de desplazamiento comúnmente empleados en robots de inspección, como los son: orugas, ruedas, tipo gusano, superficie deslizante, serpiente y caminador. De los cuales se toma uno de ellos como concepto de referencia y se hace la comparación de los demás conceptos respecto a éste, de acuerdo con criterios de evaluación para dicho concepto. Para los medios de desplazamiento se tienen en cuenta aspectos de interés o criterios definidos por el lugar en donde se desplazará el robot y por los requisitos de diseño iniciales, como: maniobrabilidad tanto horizontal como vertical, paso de dobleces del tubo, tracción; y otros definidos por aspectos de diseño y construcción, como: costo de fabricación, facilidad de ensamblaje, complejidad en diseño, número de partes y peso.

Tabla 2. Selección de medios de desplazamiento.

CONCEPTO CRITERIO	Orugas	Ruedas	Tipo Gusano	Superficie Deslizante	Serpiente	Caminador
Maniobrabilidad Horizontal	R	+	-	-	-	-
Maniobrabilidad Vertical	E	S	+	-	-	-
Paso de dobleces del tubo	F	+	-	-	+	+
Tracción	E	-	+	-	-	-
Costo de fabricación	R	+	+	-	-	S
Facilidad de Ensamblaje	E	+	-	-	-	-
Complejidad en Diseño	N	+	-	-	-	-
Número de Partes	C	+	-	-	-	-



Peso	I A	+	-	-	-	-
$\Sigma+$		8	3	0	1	1
$\Sigma-$		1	7	10	9	8
ΣS		1	0	0	0	1

Teniendo como base los resultados de la Tabla 2, se definió cuál sería el medio que mejor se adaptara a la necesidad del proyecto, obteniendo como resultado que el medio de desplazamiento debe ser por medio de ruedas.

Se definió también la forma de lograr contacto entre el/los medios de desplazamiento y la tubería, como se muestra en la Tabla 3. Se tomó como mecanismo de referencia el Hidráulico y con base en éste, se ponderan los demás mecanismos para adaptabilidad que usualmente se emplean en robots de inspección, como: muelles, amortiguadores, neumática, suspensión ajustable, husillo, piñón cremallera, pasadores en posición; de acuerdo con criterios de diseño como: control, costo de fabricación, facilidad de fabricación, facilidad de montaje, complejidad en diseño, número de partes y demás criterios que se presentan en la tabla.

Tabla 3. Selección de mecanismo para adaptabilidad al diámetro.

Concepto	Hidráulica	Muelles	Amortiguador	Neumática	Suspensión Ajustable	Husillo	Piñón Cremallera	Pasadores en Posición
Control	R	-	-	S	S	+	S	-
Costo de Fabricación	E	+	-	S	-	+	+	+
Facilidad de Fabricación	F	+	+	S	+	+	+	+
Facilidad montaje	E	+	+	S	S	+	+	+
Complejidad en Diseño	R	+	S	S	-	+	+	+
Número de Partes	E	+	S	S	S	+	+	+
Peso	N	+	S	S	-	+	+	+
Tamaño	C	+	S	S	S	+	-	+
Facilidad Mantenimiento	I	+	S	S	S	+	+	+
Fuerza Normal Disponible	A	-	-	S	-	S	S	S
Rapidez al cambio de posición		+	S	+	+	-	-	+
$\Sigma+$		9	2	1	2	9	7	9
$\Sigma-$		2	3	0	4	1	2	1
ΣS		0	6	10	5	1	2	1

Se concluyó que las dos mejores opciones que se tenían para lograr el contacto entre las ruedas ya definidas y la tubería son: el husillo, que permite regular progresivamente la separación de las ruedas con la sección, sin embargo, no realizaría movimientos rápidos para la adaptabilidad del robot y sería un sistema bastante pesado; la otra opción es por amortiguador el cual sí permite una rápida adaptabilidad al diámetro de la tubería y es menos pesado. Por lo tanto, se optó por emplear amortiguadores.

Una vez seleccionada el mecanismo para la adaptabilidad al diámetro de la tubería, se definió también el tipo de amortiguador, que de acá en adelante se hará referencia a éste como resorte, en



donde se propuso dos clases: resortes de tensión y resortes de torsión. De donde se consideró que la mejor opción era el resorte de torsión por la facilidad de su montaje o configuración, puesto que solo requiere de un pasador o eje en la articulación para que ejerza la función deseada. A este mecanismo se le ha denominado Sistema de Adaptación (Diámetro de tubería), que se puede observar en la Figura 5.

Para este caso, y de acuerdo con el concepto definido en la Tabla 2 (Medio de desplazamiento por ruedas) se definió generar el movimiento por medio de motores y las opciones que se tuvieron en cuenta son las mostradas en la Tabla 4. Decisión que consistía en concretar cuántos motores se emplearían -A-, cuantas extremidades -E- y su ubicación en el robot, ya fuese directamente en el eje de la rueda -w- o sobre el cuerpo del robot o partes intermedias entre estos dos últimos -b-.

Tomando como opción final implementar dos motores acoplados en su rotor directamente al eje de cada rueda para facilitar la construcción del robot y la generación del movimiento. Dichos motores se colocarán en extremidades opuestas para evitar efectos giratorios al desplazarse. A esta configuración se le ha denominado Sistema de Desplazamiento, como se muestra en la Figura 5.

Tabla 4. Selección de medios de generación de movimiento (desplazamiento).

Concepto Criterio	A x E _							
	3x3 w	1x3 w	3x3 b	1x3 b	4x4 w	2x4 w	4x4 b	2x4 b
Maniobrabilidad	R	-	S	-	S	+	S	-
Coste	E	+	S	+	S	+	S	S
Facilidad montaje	F	+	-	-	-	+	-	-
Complejidad en diseño	E	+	-	-	-	+	-	-
Número de partes	R	+	S	+	S	+	S	+
Peso	E	+	S	+	S	+	S	+
Tamaño	N	+	S	+	S	+	S	+
Facilidad mantenimiento	C	+	-	+	-	+	-	+
Paso por dobléz y curvas	I	-	S	-	S	+	S	-
Uso de energía	A	+	S	+	S	+	S	+
$\Sigma+$		8	0	6	0	10	0	6
$\Sigma-$		2	3	4	3	0	3	4
ΣS		0	7	0	7	0	7	0

Cada uno de los criterios presentes en las Tablas 2, 3 y 4 permiten definir qué tan asertivo es el concepto que se elige frente a todos los propuestos para una necesidad, basado en requerimientos de diseño iniciales. Finalmente, y para darle una estructura al concepto del robot, se definió el Sistema de adaptación (Dirección de la tubería), para cumplir con otro de los requerimientos de diseño, que logre dar giros hasta de 90° en el interior de la tubería se definió que el robot debe tener una estructura modular [5][11].

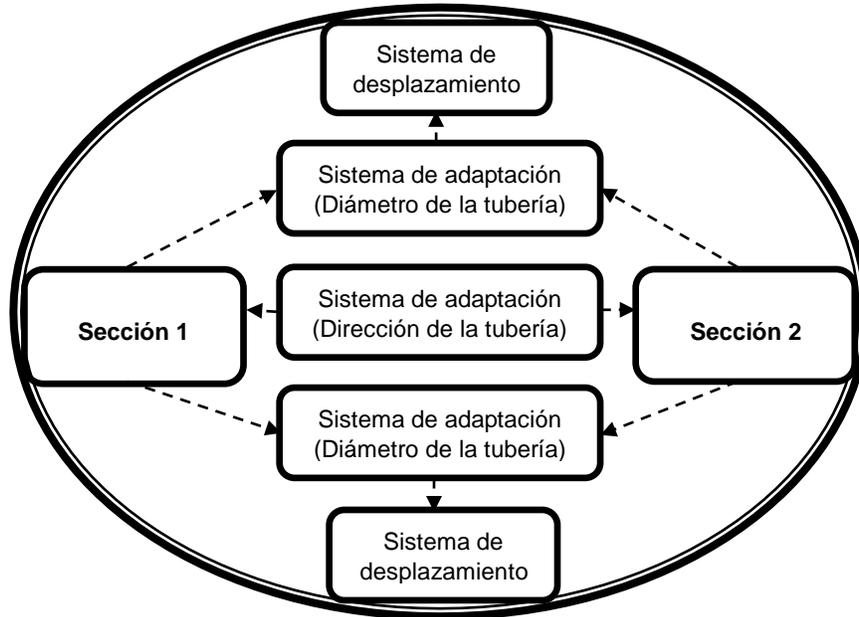


Figura 5. Diagrama de bloques: Concepto de robot de inspección interna de tubería.

Y teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la Tabla 3 para el Sistema de Adaptabilidad al Diámetro de la tubería, que consiste en la inclusión de amortiguadores, para este sistema se ha definido incluir un amortiguador de tipo resorte de tensión, el cual permite realizar con gran facilidad este movimiento gracias a la flexibilidad que proporciona, de modo que los módulos estén unidos por medio de éste.

Diseño del mecanismo

Partiendo de las características definidas en la selección del concepto, se elabora el diseño del mecanismo que puede tener diversas configuraciones o aspectos. De modo que dicho diseño se ha dividido en tres, el diseño del sistema adaptable al diámetro, diseño del sistema modular y diseño del sistema de desplazamiento.

Diseño del sistema adaptable al diámetro

De acuerdo con la alternativa definida para la adaptabilidad al diámetro de la tubería definida en la Tabla 3, se realiza el diseño (CAD) para este sistema que comprende un centro de sección, al cual se encuentran conectadas cuatro extremidades equidistantes entre sí -radialmente respecto al centro de la sección- y en una configuración de pares de extremidades opuestas, para facilitar el diseño del sistema; y posteriormente, establecer su comportamiento, análisis matemático y construcción [12].

Adicionalmente, cuenta con un resorte de torsión en cada unión entre las extremidades y el centro de sección, tal y como se puede apreciar en la Figura 6. El resorte de torsión genera un movimiento tipo bisagra en las extremidades del mecanismo, lo que permite la adaptabilidad al diámetro de la tubería y a su vez, generar la fuerza requerida para mantener las extremidades en contacto con la superficie siempre y cuando el diámetro de ésta no sobrepase las dimensiones máximas para las que fue diseñado el mecanismo.

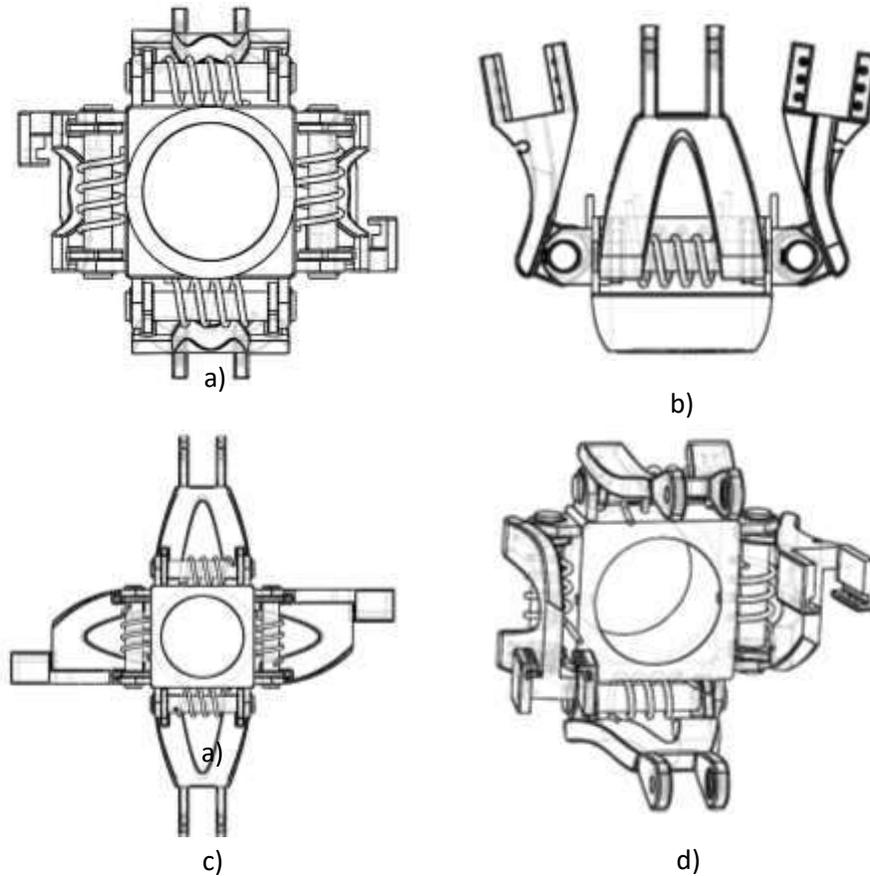


Figura 6. Diseño CAD de sistema adaptable al diámetro. a) Vista frontal b) Vista superior c) Vista posterior d) Vista isométrica

En el diseño presentado en la Figura 6, se ha tenido en cuenta los espacios o la forma como se incluirán los elementos tanto para generar el desplazamiento del mecanismo, como la estructura modular.

Diseño del sistema modular

Para lograr que el robot tenga una estructura modular, se diseñaron algunas piezas de acoplamiento que cumplen la función de soportes de sujeción para el resorte de tensión ver Figura 10- que actúa como articulación entre secciones, tal como se definió en la selección del concepto. Estas piezas van ubicadas en cada centro de sección. En la Figura 7 se observa los dos módulos diseñados para una mínima configuración modular a los cuales se han llamado sección frontal y sección trasera correspondientemente, ya que el robot puede tener tantas secciones como sea necesario. Finalmente, para cumplir con las especificaciones de diseño, se genera el diseño CAD del sistema de desplazamiento del mecanismo.

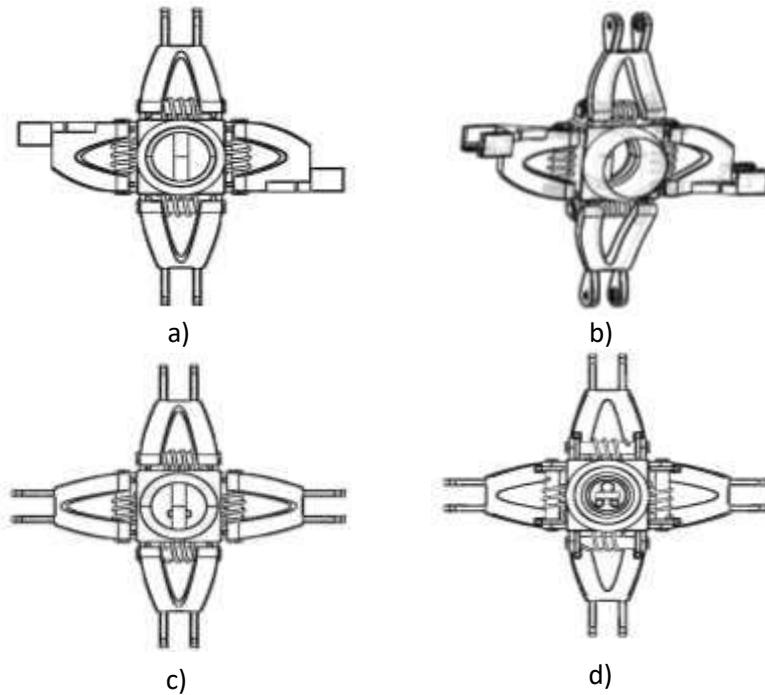


Figura 7. Diseño CAD de sistema modular. Sección frontal: a) Vista posterior b) Vista isométrica. Sección trasera: c) Vista frontal d) Vista posterior

Diseño del sistema de desplazamiento

Este sistema está diseñado de acuerdo con las características definidas en la selección de concepto en la Tabla 4, que consiste en la inclusión de dos motores conectados en su rotor al eje de una de las ruedas cada uno, así como se muestra en la Figura 8. Las ruedas que poseen motores se han denominado ruedas motrices y la extremidad en la cual van ubicadas se han denominado extremidades motrices, y se encuentran en posiciones opuestas para obtener un desplazamiento controlado del dispositivo, dicha configuración se observa en la Figura 9.

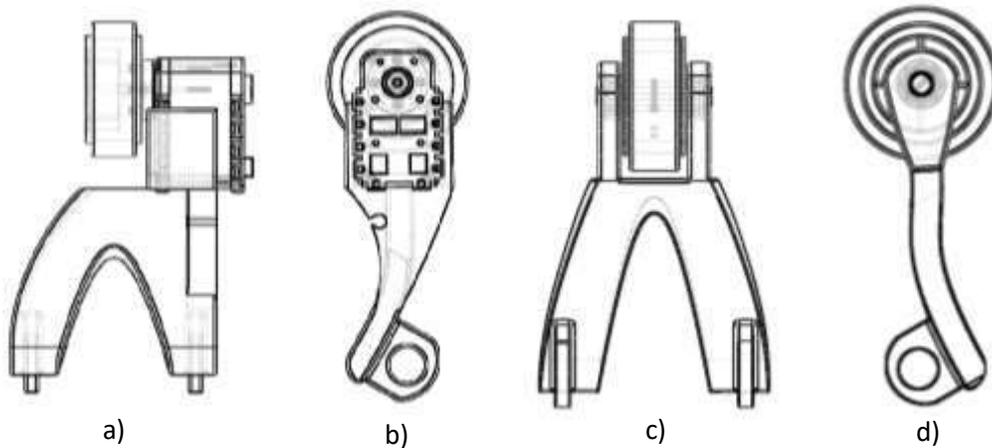


Figura 8. Diseño CAD de sistema de desplazamiento. Extremidad motriz: a) Vista posterior b) Vista lateral. Extremidad pasiva: c) Vista posterior d) Vista lateral



En cuanto a las demás extremidades, han sido diseñadas de forma que poseen ruedas pasivas en el extremo de las mismas y van sujetas por medio de pasadores. A estas extremidades se le ha denominado extremidades pasivas. En cuanto a la sección trasera, está comprendida por cuatro extremidades pasivas, como se visualiza en la Figura 9.

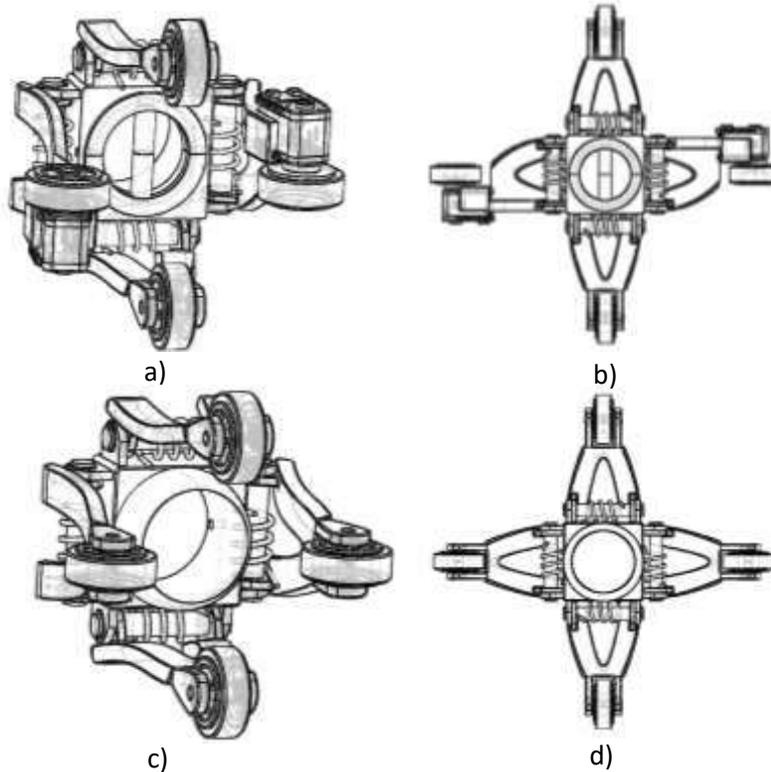


Figura 9. Diseño CAD de sistema de desplazamiento. Sección frontal: a) Vista isométrica con extremidades retraídas b) Vista posterior con extremidades extendidas. Sección trasera: c) Vista isométrica con extremidades retraídas d) Vista posterior con extremidades extendidas.

Resultados

Se obtiene como diseño final un sistema compuesto por dos secciones en las que cada una cuenta con cuatro extremidades que se retraen y extienden por medio de un sistema de movimiento tipo bisagra, generado por un resorte de torsión ubicado sobre un pasador en cada articulación existente entre el centro de sección y cada extremidad.

Las secciones se encuentran unidas entre sí por una articulación flexible [13] -resorte de tensión- que permite realizar los giros relativos entre secciones. El resorte está sujeto del centro de cada sección por medio de piezas de acoplamiento centrales. El diseño general se puede observar en la Figura 10, en donde el diseño de la imagen c) contiene además una cámara frontal, una línea de vida y un recubrimiento en la articulación central del diseño.

Y, en cuanto a la generación de movimiento o desplazamiento del robot, se incluyeron dos motores acoplados de su rotor directamente al eje de rotación o centro de una rueda cada uno. Estas ruedas se encuentran ubicadas en extremidades opuestas y hacen parte de la sección frontal.

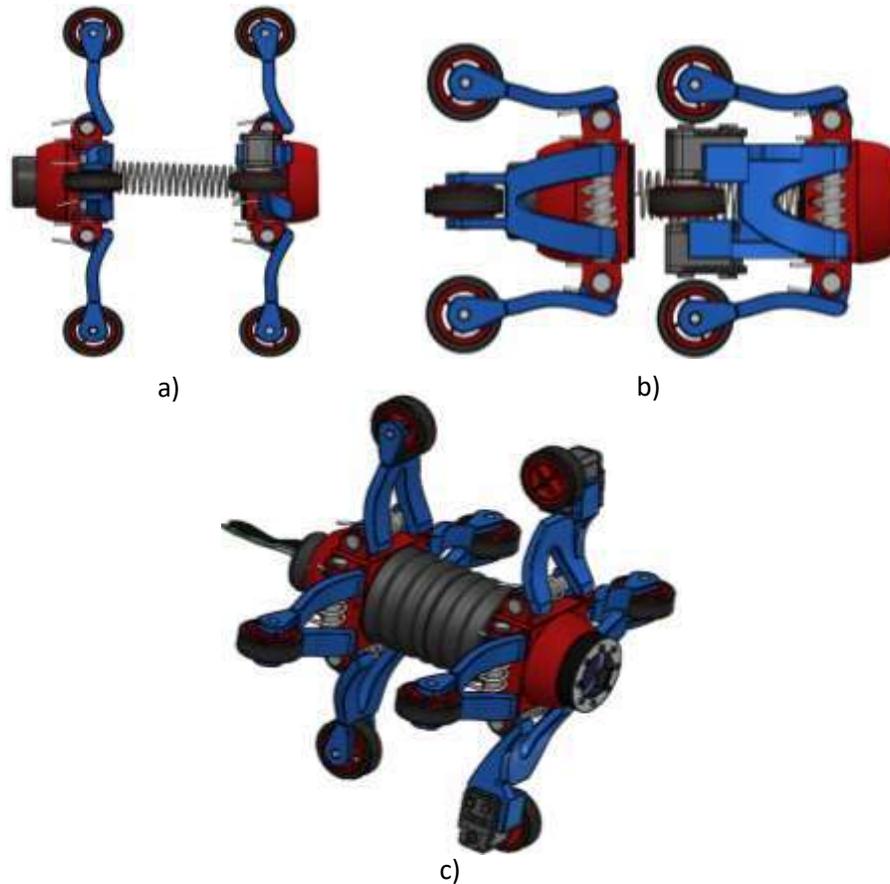


Figura 10. Diseño CAD del mecanismo adaptable para robot de inspección de tuberías. a) Vista lateral con extremidades extendidas b) Vista lateral con extremidades retraídas c) Vista isométrica con extremidades extendidas

El diseño final, como se muestra en la Figura 11, permite la adaptación permanente al diámetro de la tubería por acción de los resortes de torsión en las extremidades y el resorte de tensión con su recubrimiento como articulación central. En dicha figura se observa a) el diseño del robot desplazándose en el interior de una tubería, exactamente en la reducción de diámetro de ésta, donde el robot pasa de un diámetro de tubería pequeño -6"- a uno de mayor tamaño -8"-; así mismo, b) el robot desplazándose dentro de un codo de 90°.

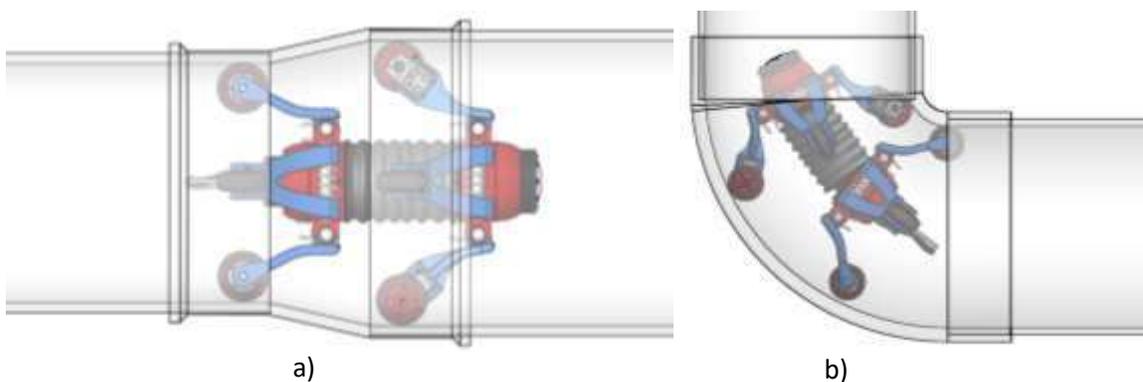


Figura 11. Diseño CAD del mecanismo en el interior de una tubería. a) Paso del robot por reducción en la tubería. b) Paso del robot por codo de 90° en la tubería.



Discusión

Basados en las especificaciones de diseño y las características del concepto definidas en este artículo, se ha logrado diseñar el mecanismo para un robot de inspección de tuberías que permite adaptarse a diámetros cambiantes en la tubería, por medio de un sistema de adaptabilidad al diámetro de movimiento tipo bisagra generado por un resorte de torsión incluido en cada articulación de las extremidades con las que cuenta.

Así mismo, la fuerza ejercida por el resorte de torsión sobre la extremidad es transmitida al punto de contacto de la rueda con la superficie de forma perpendicular a ésta, lo que le permite al mecanismo permanecer en contacto en todo momento. Y al poseer una posición equidistante entre extremidades, la fuerza ejercida por cada rueda de las extremidades sobre la superficie en contacto, serán iguales y opuestas en pares de fuerzas.

A su vez, el diseño permite la adaptabilidad al cambio de dirección de la red de tubería como se especifica en uno de los requerimientos, esto por medio de la conexión de un resorte de tensión entre las secciones del robot, que posee la suficiente flexibilidad y longitud para lograr los giros requeridos de 45° y 90° en los codos de la red.

En cuanto al último de los requerimientos de diseño: el poder conocer la forma de desplazamiento y tener control de ello, se incluyen ruedas pasivas y motrices en los extremos de las extremidades del mecanismo. Siendo las ruedas motrices las generadoras del movimiento por medio de la conexión de éstas al rotor de un motor cada una y posicionadas en extremos opuestos para realizar un desplazamiento longitudinal en el interior de la tubería; y las ruedas pasivas permiten la movilidad del mecanismo al ser inducidas por el movimiento generado por las ruedas motrices.

Para todo ello, se empleó el método de selección de concepto de la Convergencia Controlada de Pugh, que permite determinar el grado de cumplimiento de la relación Criterios de diseño – Conceptos, en donde de forma cualitativa se evalúa esta relación puntuándolos como: mejor, superior o igual a un concepto de referencia, para finalmente por medio de una sumatoria conseguir un concepto adecuado.

Referencias

- [1] O. Tatar, C. Cirebea, A. Alutei y D. Mandru, “The Design of Adaptable Indoor Pipeline Inspection Robots”, Technical University of Cluj-Napoca, IEEE, Romania, 2010.
- [2] B.B.V.L. Deepak, M.V.A. Raju y B.B. Biswal, "Development of in-pipe robots for inspection and cleaning tasks: Survey, classification and comparison", *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*, Vol. 4 Issue: 3, pp.182-210, Septiembre 2016.
- [3] A. Lamas, “Robot inspeccionador de tuberías”, Tesis de Maestría, Ingeniería Mecánica, Centro Internacional de Postgrado, Universidad de Oviedo, España, 2017.
- [4] E. C. Orozco, E. Castillo, F. A. Aguirre, J. Franco, K. H. Floreán y E. Francisco, “Robótica y Mecatrónica de Servicios: Teoría y Aplicaciones”. *Asociación Mexicana de Mecatrónica A. C.*, Capítulo 3, pp. 18 – 32, 2016.



- [5] J. Chen, T. Chen y Z. Deng, “Design method of Modular Units for Articulated in-Pipe Robot Inspecting System”, Second International Conference on Digital Manufacturing & Automation, IEEE, Zhangjiajie, Hunan, pp. 389-392, 2011.
- [6] D. Lee, J. Park, D. Hyun, G. Yook y H. Yang, “Novel mechanisms and simple locomotion strategies for an in-pipe robot that can inspect various pipe types”, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 56, pp. 52-68, Mayo 2012.
- [7] D. Chablat, S. Venkateswaran y F. Boyer, “Mechanical Design Optimization of a Piping Inspection Robot”, 28th CIRP Design Conference, Nantes, Francia, pp. 307-312, Mayo 2018.
- [8] M. A. González, “Procedimientos de diseño en mecatrónica”, *Ingeniería Investigación y Tecnología*, Vol. XII, Núm. 1, pp. 209-222, 2011.
- [9] D. Justel, E. Pérez, R. Vidal, A. Gallo y E. Val, “Estudio de métodos de selección de conceptos”, XI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, Lugo, pp. 26-28, Septiembre 2007.
- [10] D. Justel, E. Arriaga, R. Vidal, V. Franco y E. Val, “Evaluation method for selecting innovative product concepts with greater potential marketing success”. International Conference on Engineering Design, ICED, Paris, pp. 28-31, Agosto 2007.
- [11] L. Qingyou, R. Tao y Y. Chen, “Characteristic analysis of a novel in-pipe driving robot”, *Mechatronics*, Vol 23, Issue 4, pp. 419-426, Junio 2013.
- [12] K. Othman, M. Naim, M. Iqbal, Naomi, N. Izlynda y S. Ismail, “Mechanical Structure Optimization of Pipe Inspection Robot for Domestic Water Pipe Line”. *SCIREA Journal of Mechanical Engineering*. Vol. 1, Issue 1, Octubre 2016.
- [13] W. Jeon, I. Kim, J. Park y H. Yang, "Design and control method for a high-mobility in-pipe robot with flexible links", *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 40 Issue: 3, pp. 261-274, 2013.



Control Robusto Basado en Observador GPI para el lazo de corriente de un convertidor AC/DC tipo Boost Bridgeless

Robust Control Based on GPI Observer for the current loop of a converter AC/DC Boost Bridgeless type

Fernando J. Regino^{1,γ}, Jully A. Gómez¹, Edwin E. Espinel¹

1. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña Norte de Santander, Colombia

γ. Autor correspondiente: fjreginou@ufps.edu.co

Resumen

Este documento describe el análisis de una técnica de control, Control basado en observador proporcional integral generalizado (GPI). El análisis se realizó en el contexto de corrección del factor de potencia y la reducción del porcentaje de distorsión armónica total. Se llevaron a cabo experimentos y se encontró que el control basado en el observador proporcional integral generalizado tiene un alto rendimiento ya que es capaz de reducir el THD a 1.9% y logra un factor de potencia unitario.

Palabras clave: Convertidor de potencia, Control basado en observador Proporcional integral generalizado, factor de potencia, distorsión armónica total.

Abstract

This document describes the analysis of a control technique, Generalized Proportional Integral (GPI) observer-based Control. The analysis was made on the context of power factor correction and total harmonic distortion reduction. Experiments were carried out and it was found that the control based on the generalized proportional integral observer has a high performance since it is capable of reducing the THD to 1.9% and achieves a unit power factor.

Keywords: Power converter Generalized Proportional Integral observer-based Control, power factor, total harmonic distortion.

Introducción

Los convertidores de potencia o convertidores AC/DC se utilizan en las aplicaciones de electrónica de potencia, como en inversores, fuentes de alimentación entre otros. La mayoría de estas aplicaciones poseen un sistema de corrección de factor de potencia (PFC) para mejorar la eficiencia y cumplir con las normas y estándares de calidad de la energía [1].

Gran parte de los circuitos convertidores de potencia con corrección de factor de potencia (PFC) están formados por un puente diodos que se encarga de rectificar la señal de corriente alterna (AC), seguido por un convertidor DC/DC encargado de llevar la tensión de salida del convertidor al nivel deseado [2]. Entre los convertidores AC/DC más utilizados para aplicaciones con PFC se encuentra la topología Boost bridgeless (Fig. 1), conformada por dos convertidores tipo Boost que trabajan de forma alterna dependiendo del encendido y apagado del switch [3]. La topología Boost Bridgeless se presenta como recurso para minimizar las pérdidas por conducción reduciendo el número de dispositivos semiconductores. Sin embargo, el control de los armónicos sigue siendo



un tema de investigación debido a problemas relacionados con la presencia de estos en la red eléctrica por efectos de la conmutación.

Este documento propone una estrategia de control basado en un observador GPI para el lazo de corriente del convertidor Boost bridgeless, esta técnica utiliza un controlador GPI lineal robusto para sistemas perturbados no lineales. Esta estrategia estima las perturbaciones a través de un observador lineal llamado observador proporcional integral generalizado (observador GPI). Las perturbaciones (componentes armónicas de la frecuencia fundamental de la red 60Hz) y la incertidumbre se modelan como componentes aditivos, ya sean externos o propios de la planta y el observador GPI las estima, de forma unificada [4]. El objetivo es reducir el porcentaje de distorsión armónica total (THD) por debajo del 5% y llevar el factor de potencia (FP) a la unidad [5]. Las estrategias de control GPI son fáciles de implementar y han demostrado un mejor rendimiento que el proporcionado por las técnicas basadas en modelos clásicos.

Este documento está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 presenta el modelo matemático del convertidor AC/DC tipo Boost Bridgeless. En la sección 3 se presenta una descripción de la estrategia de control basado en observador GPI. La sección 4 muestra el diseño de dicha estrategia para el modelo promediado simplificado del convertidor AC/DC. La sección cinco muestra los resultados de la implementación del arreglo propuesto y la sección seis se presentan las conclusiones.

Operación y Análisis del Circuito

La estrategia de control que se diseñó se implementó en un convertidor AC/DC tipo Boost bridgeless el cual hace parte de una plataforma experimental para pruebas de laboratorio, la cual está compuesta por un par de inductores ($L1$ y $L2$) de $707\mu\text{H}$ cada uno con sus respectivas resistencias parásitas ($RL1$ y $RL2$) de 0.5Ω , todas las medidas se tomaron a 20kHz ; dos diodos de potencia Fast Recovery en la parte superior ($D1$ y $D2$) y dos Mosfets IRFP260n en la parte inferior ($Q1$ y $Q2$), un sensor de voltaje de línea y un sensor de corriente de línea. El bus DC está compuesto por el condensador C de $660\mu\text{F}$, una resistencia de carga R de 32Ω y un sensor de voltaje. El convertidor se alimenta con tensión de CA, la cual entra a la etapa de corrección de factor de potencia. En esta etapa se encuentran dos convertidores elevadores tipo Boost que operan alternadamente en cada semi-ciclo de la tensión de línea [6].

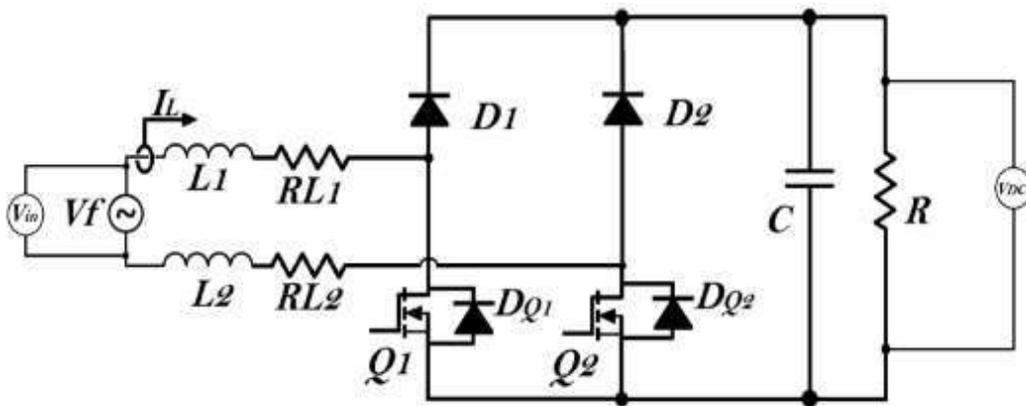


Fig. 1. Diagrama esquemático del PFC Boost Bridgeless



La dinámica del convertidor se rige por el tiempo de encendido y apagado los Mosfet Q1 y Q2, estos establecen el recorrido de la corriente. En el semi-ciclo positivo la señal de PWM actúa directamente sobre Q1 mientras Q2 permanece apagado, en el semi-ciclo negativo la señal de PWM actúa directamente sobre Q2 mientras Q1 permanece apagado.

La Fig. 2 muestra recorrido de la corriente en el semi-ciclo positivo con Q1 y Q2 apagados, es en este instante en donde se carga el capacitor C; la Fig. 4 muestra recorrido de la corriente en el semi-ciclo positivo con Q1 encendido y Q2 apagado cargando las bobinas L1 y L2, La Fig. 5 muestra recorrido de la corriente en el semi-ciclo negativo con Q1 y Q2 apagados, cargando el capacitor C; la Fig. 6 muestra recorrido de la corriente en el semi-ciclo negativo con Q1 apagado y Q2 encendido cargando las bobinas L1 y L2.

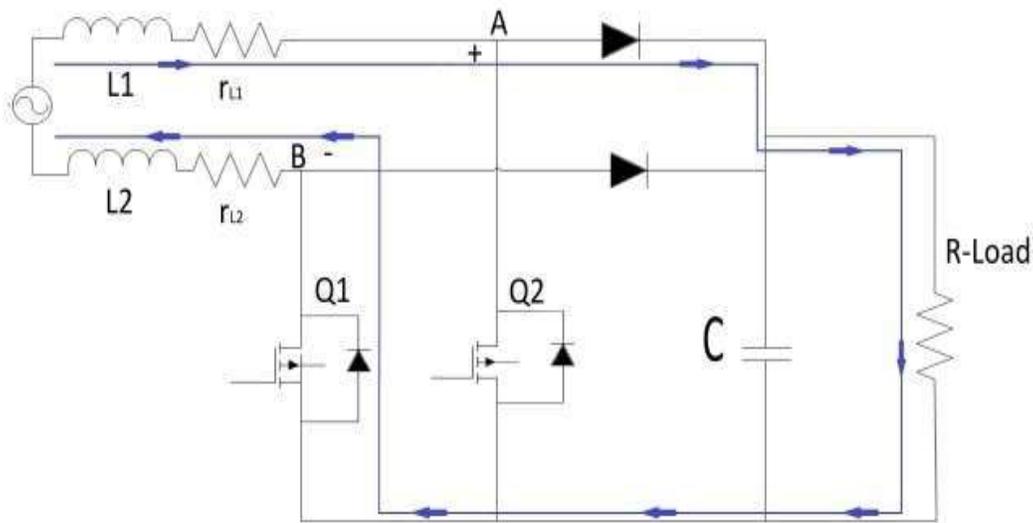


Fig. 2 recorrido de la corriente en el semi-ciclo positivo con Q1 y Q2 apagados [7].

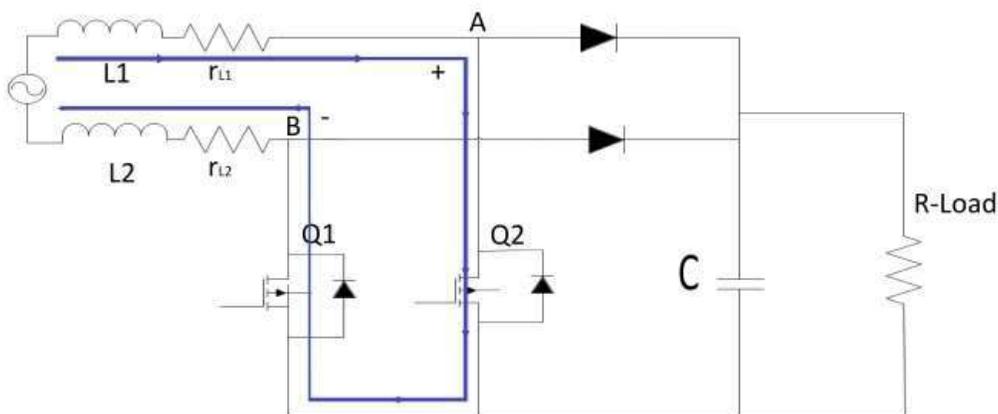


Fig. 3 recorrido de la corriente en el semi-ciclo positivo con Q1 encendido y Q2 apagado [7].

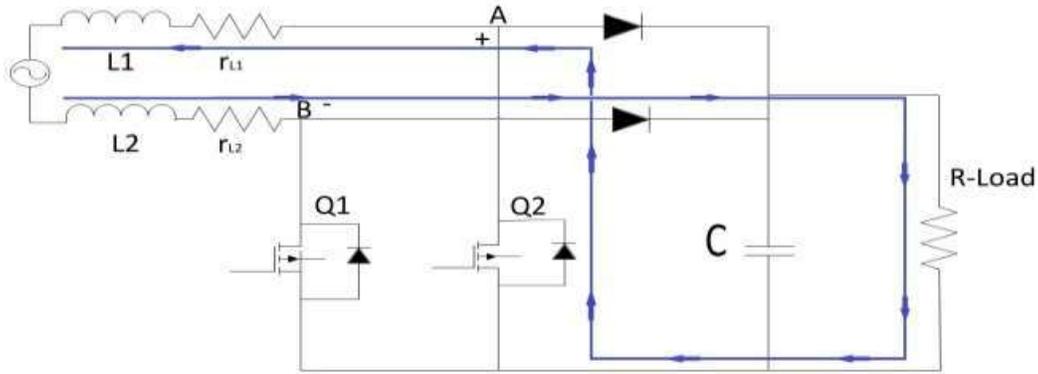


Fig. 4 recorrido de la corriente en el semi-ciclo negativo con Q1 y Q2 apagados [7].

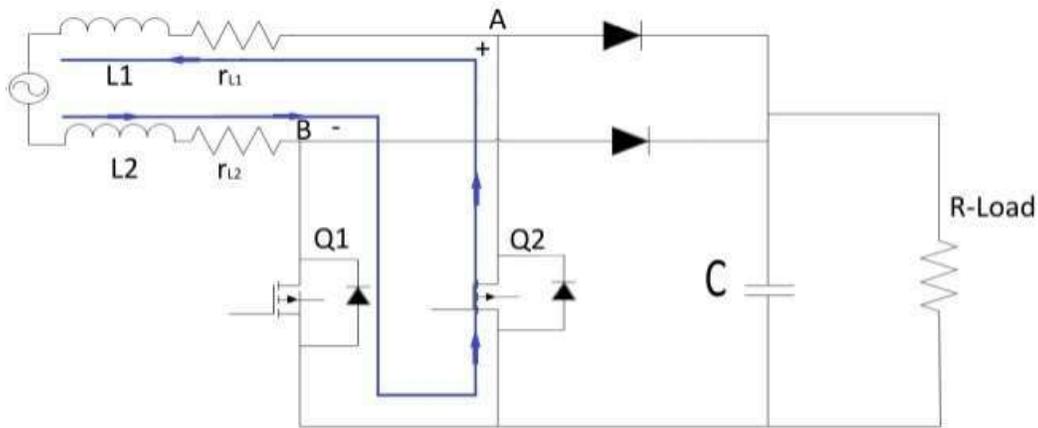


Fig. 5 recorrido de la corriente en el semi-ciclo negativo con Q1 apagado y Q2 encendido [7].

Teniendo en cuenta el recorrido de la corriente se hace el análisis del circuito empleando la ley de tensiones de Kirchhoff (ver Fig. 2).

$$v_f(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} + R_L i_L(t) + v_{ab}(t) \quad (1)$$

Donde $v_f(t)$ es la tensión de la red ($v_f(t) = V_f \sqrt{2} \sin(\omega_n t)$), $i_L(t)$ es la corriente que pasa por la bobina, L es la inductancia equivalente del circuito, R_L es la resistencia equivalente del circuito igual $r_{L1} + r_{L2}$ y $v_{ab}(t)$ es la tensión vista desde los nodos A y B del circuito.

Cuando $v_f(t)$ es positiva la tensión $v_{ab}(t)$ promedio es:

$$\overline{v_{ab}(t)} = (1 - D)(v_{c(t)} + v_{D1}) + v_{Q1}D + v_{DQ2} \quad (2)$$

Cuando $v_f(t)$ es negativa la tensión $v_{ab}(t)$ promedio es:

$$\overline{v_{ab}(t)} = -(1 - D)(v_{c(t)} + v_{D2}) - v_{Q2}D - v_{DQ1} \quad (3)$$

En donde $v_{D1}(t)$ es el voltaje del diodo D1, $v_{c(t)}$ es el voltaje DC del capacitor de salida, $v_{DQ2}(t)$ es el voltaje del diodo interno del Mosfet Q2, $v_{DQ1}(t)$ es el voltaje del diodo interno del Mosfet Q1,



$v_{Q1(t)}$ es la tensión drenador-surtidor del Mosfet Q1, $v_{Q2(t)}$ es la tensión drenador-surtidor del Mosfet Q2.

En las ecuaciones (2) y (3), D corresponde al ciclo útil de la señal de PWM que toma valores en un intervalo cerrado de [0,1]. Al sumar las ecuaciones (2) y (3) es posible afirmar que el modelo promediado-simplificado de la planta es:

$$\frac{di_{L(t)}}{dt} = -\frac{R_L}{L}i_{L(t)} + \frac{v_f(t)}{L} + \frac{\alpha}{L} \quad (4)$$

Donde α es:

$$\alpha = \begin{cases} (1-D)v_{c(t)}; \text{ semi - ciclo positivo} \\ -(1-D)v_{c(t)}; \text{ semi - ciclo negativo} \end{cases} \quad (5)$$

Al aplicar la transformada de Laplace a la ecuación (4), y tomando v_f como una perturbación se obtiene la ecuación (6).

$$sI_L = -\frac{R_L}{L}I_L + \frac{\alpha}{L} \quad (6)$$

De la ecuación (6) se despeja $\frac{I_L}{\alpha}$ y da como resultado el modelo promediado-simplificado a la frecuencia de conmutación de la planta:

$$\frac{I_L}{\alpha} = \frac{1}{(Ls + R_L)} \quad (7)$$

Diseño del Controlador

El control basado en observador GPI, está sustentado en un observador de Luenberger extendido, que se utiliza para estimar las perturbaciones de carácter externo e interno de la planta. Si se tiene un sistema de primer orden cuyo modelo matemático puede escribirse como:

$$\dot{x}_1(t) = ku(t) + \xi(t) \quad (8)$$

Entonces es posible llevar a cabo una realización en variables de estado del sistema descrito en la ecuación 8, de tal forma que uno de los estados corresponda a la estimación de $\xi(t)$. Al completar dicho proceso se obtiene la representación del sistema que se muestra en la ecuación 9. En esta última representación, se puede apreciar que la variable de estado $x_1(t)$ corresponde a la salida de la planta, $x_2(t)$ corresponde a la perturbación de la planta y que $x_3(t)$ corresponde a la primera derivada de la perturbación de la planta.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= ku(t) + x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= x_3(t) \\ \dot{x}_3(t) &= \xi(t)^{(2)} \end{aligned} \quad (9)$$

Ahora bien, es posible construir un observador de estados para el sistema descrito por la ecuación (9). Dicho observador es el que se muestra en la ecuación (10).



$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_1(t) &= \mathbf{k}u(t) + \hat{x}_2(t) + \mathbf{l}_2(x_1(t) - \hat{x}_1(t)) \\ \dot{\hat{x}}_2(t) &= \hat{x}_3(t) + \mathbf{l}_1(x_1(t) - \hat{x}_1(t)) \\ \dot{\hat{x}}_3(t) &= \mathbf{l}_0(x_1(t) - \hat{x}_1(t))\end{aligned}\quad (10)$$

Donde $\hat{x}_2(t)$ es el estimado de la perturbación y $(x_1(t) - \hat{x}_1(t))$ es el error de estimación. La dinámica del error de estimación E del observador de la ecuación (10) está dada por la ecuación (11).

$$s^2\xi(t) = (s^3 + \mathbf{l}_2s^2 + \mathbf{l}_1s + \mathbf{l}_0)E \quad (11)$$

Si $\xi(t)^{(2)}$ es acotada y si los coeficientes l_i (con $i = 0, 1, 2$), se escogen de tal forma que las raíces del polinomio de la ecuación (12) estén en el lado izquierdo del plano complejo, el error de seguimiento será acotado y la cota puede hacerse tan pequeña como se quiera al alejar las raíces de la ecuación del eje imaginario.

$$s^3 + \mathbf{l}_2s^2 + \mathbf{l}_1s + \mathbf{l}_0 \quad (12)$$

Las estimaciones proporcionadas por el observador GPI permiten el planteamiento de una ley de control para el rechazo de la perturbación y establecimiento de un error de seguimiento. El control basado en observador GPI para el seguimiento de trayectorias está dado por la ecuación (13).

$$u(t) = \frac{1}{\mathbf{k}}[y_{(t)}^{*(1)} + k_o(y_{(t)}^* - x_1(t)) - \hat{x}_2(t)] \quad (13)$$

En donde el parámetro k_o del controlador se selecciona de forma que la dinámica del error de seguimiento sea estable. El control basado en observador GPI lleva el error de seguimiento asintótica y exponencialmente a una vecindad suficientemente pequeña de cero, dicha vecindad depende de la cota última del error de estimación definido anteriormente [8].

En la Fig. 6 se muestra la estructura del control basado en observador GPI propuesto en la ecuación (13) en donde la perturbación estimada por el observador GPI se pre-alimenta en la señal de control para eliminar la perturbación original de la planta.

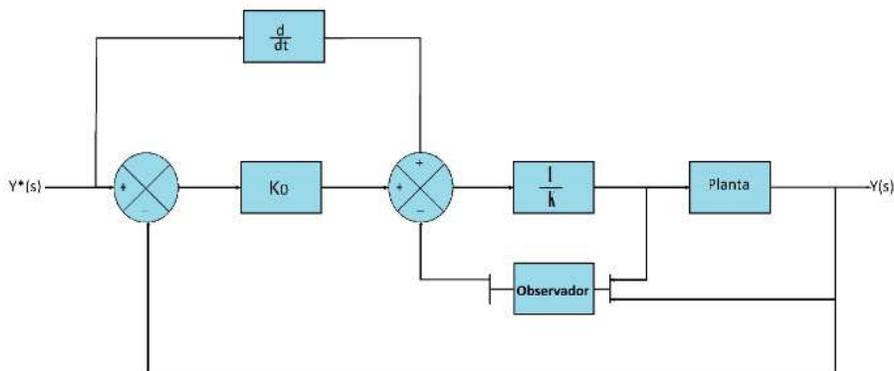


Fig. 6 Diagrama de bloques del control basado en Observador GPI.

La estructura de la señal de control del control basado en observador GPI que se muestra en la ecuación 13 parte del supuesto que la m – ésima derivada de la perturbación con respecto al



tiempo es cero [9]. Si se toma $\dot{y}(t)$ como la derivada de la corriente, $k = 1/L$, $u(t)$ es la acción de control y $\xi(t)$ es la perturbación la ecuación 8 se puede escribir como:

$$\dot{y}(t) = k u(t) + \xi(t) \quad (14)$$

Partiendo del observador planteado en la ecuación 10, se toman como variables de estado: $x_1(t) = y(t)$, $\dot{x}_1(t) = \dot{y}(t)$, $x_2(t) = \xi(t)$ y $x_3(t) = \xi(t)^{(1)}$. Los coeficientes l_i se seleccionaron para obtener las siguientes raíces del polinomio característico: $-2\pi 950$, $-2\pi 10000$, $-2\pi 50000$, entonces el controlador adquiere la forma simple de la ecuación 15 con valores de $\kappa = 707.2135$, $n = 1$ y $K_0 = 508$.

$$u(t) = \frac{1}{\kappa} \left[y^{*(1)}(t) + K_0 (y^*(t) - y_1(t)) - \hat{\xi}(t) \right] \quad (15)$$

Resultados

Los experimentos se realizaron a una potencia constante de 400W, los resultados fueron satisfactorios puesto que se cumplió con el objetivo propuesto. En las Fig. 7, se muestran las gráficas de corriente y referencia de corriente obtenidas en la implementación de esta estrategia de control, en esta se observa la señal de referencia (Rojo) y la señal de corriente medida (Azul), los resultados de la estrategia de control propuesta se evaluaron teniendo en cuenta dos aspectos, el seguimiento de la señal de referencia el cual se mide con el porcentaje de error cuadrático medio (ECM), y el rechazo activo de perturbaciones, que se mide con el porcentaje de THD y el factor de potencia.

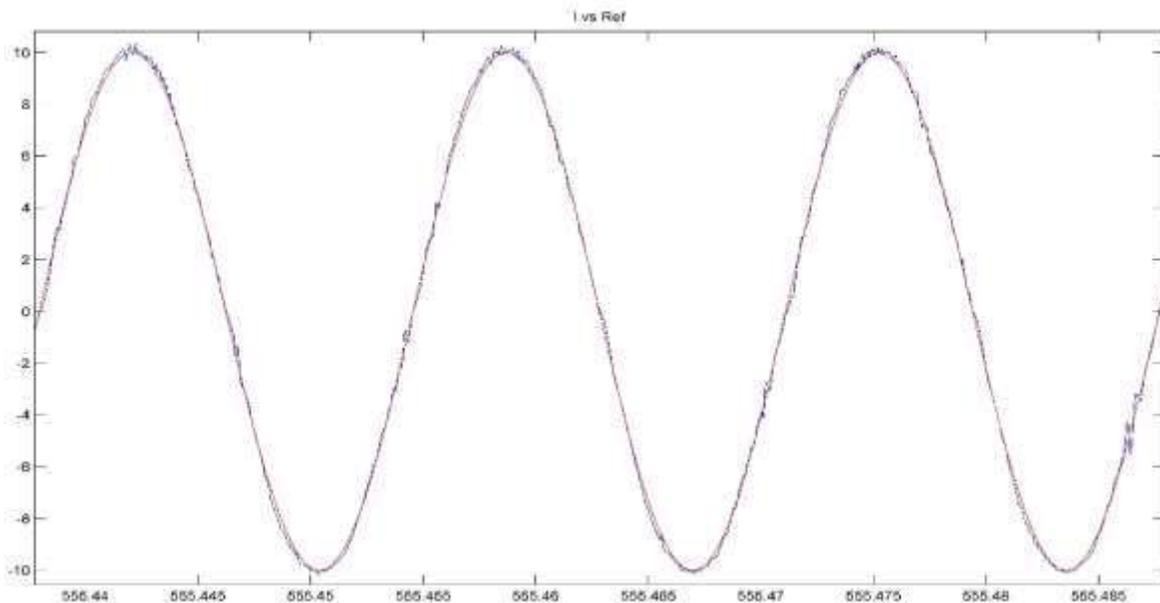
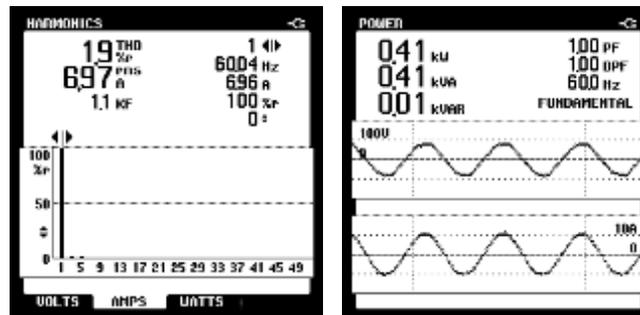


Fig. 7 Referencia de corriente vs corriente de entrada del sistema Control basado en observador GPI.



El porcentaje de error cuadrático medio para esta gráfica es de 3.209%, el porcentaje de THD medido al aplicar la estrategia de control propuesta es de 1.9% con un factor de potencia de 1 como se muestra en la Fig. 8.



a) THD

b) PF y Potencia

Fig. 8 Datos Analizador de redes Control basado en observador GPI

Con el fin de evaluar el rendimiento del control basado en el observador GPI, se comparó con el control proporcional integral (PI) el cual dio como resultado un porcentaje de EMC de 7.348%, un THD de 3.6% y un factor de potencia de 0.99. A pesar de las no linealidades del modelo, el controlador GPI presenta mejores resultados que el otro controlador propuesto.

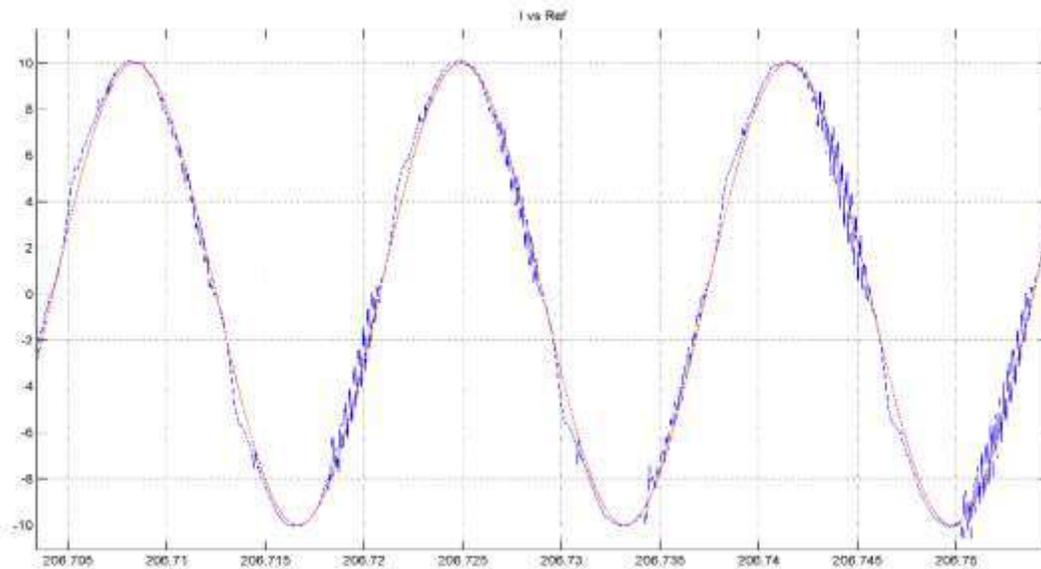


Fig. 9 Referencia de corriente vs corriente de entrada del sistema Control Proporcional Integral (PI)

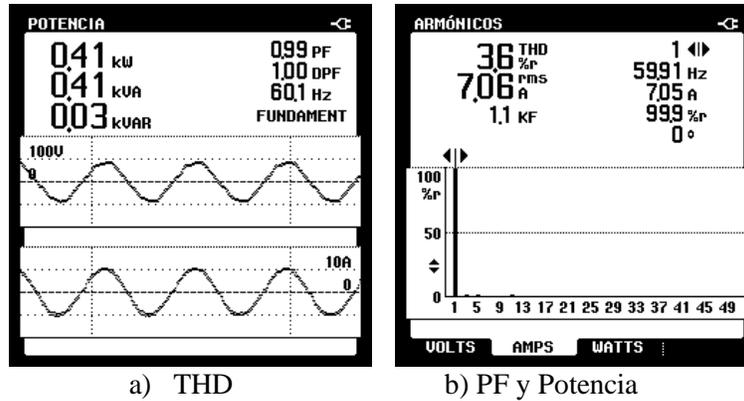


Fig. 10 Datos Analizador de redes Control basado en observador GPI

Tabla 1. Evaluación del rendimiento

Control	THD (%)	FP	ECM (%)
Obs. GPI	1.9	1	3.209
PI	3.6	0.99	7.348

Conclusiones

En este artículo, se provee una aplicación experimental de un control de seguimiento de trayectoria de salida con rechazo activo de perturbaciones. Bajo este enfoque, se diseñó un controlador basado en un observador GPI para la el lazo de corriente del PFC Boost Bridgeless.

El enfoque incluye el uso de un observador extendido, lineal y de alta ganancia, conocido como el observador GPI. Este observador se usa para estimar los armónicos que actúan como perturbaciones aditivas que afectan la dinámica de la señal de salida. Esta información on-line es utilizada por el control para la anulación efectiva, de las incertidumbres del sistema, las no linealidades del circuito y la presencia de parámetros inciertos.

La estrategia de control propuesta cumple con los estándares para la regulación de armónicos en las línea de alimentación, como el IEC 1000-3-2[10], el EN61000-3-2 [11] y el estándar IEEE519 que reglamentan la cantidad de armónicos en la red eléctrica, y limita el porcentaje de THD de la señal de corriente de entrada a un máximo de 5% [12]. Teniendo en cuenta esto el control basado en observador GPI presenta un buen desempeño, puesto que su porcentaje de THD fue de 1.9% por debajo del máximo permitido.



Referencias

- [1] J. A. Villarejo and J. Sebastián, “Optimizing the Design of Single-Stage PFC,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 54, no. 3, pp. 1472–1482, 2007.
- [2] M. Mahmood, H. Chiu, S. Member, and Y. Lo, “Isolated Dual Boost Bridgeless Power Factor Correction AC-DC Converter,” *1st Int. Futur. Energy Electron. Conf.*, pp. 465–470, 2013.
- [3] W. De Jesus Kremes and C. H. I. Font, “PWM techniques for a single-phase PFC bridgeless SEPIC rectifier,” *2016 12th IEEE Int. Conf. Ind. Appl. INDUSCON 2016*, 2017.
- [4] J. D. Munoz, J. Cortes-Romero, J. S. Esmeral, and L. M. Mendez, “GPI observer based linear control of the Stewart-Gough platform,” *2015 IEEE 2nd Colomb. Conf. Autom. Control. CCAC 2015 - Conf. Proc.*, vol. 6, pp. 1–6, 2015.
- [5] E. Fernández, V. Sala, and L. Romeral, “Method to Reduce THD and Improve Efficiency in SiC Power Converter .,” *IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, pp. 753–758, 2018.
- [6] K. M. S. Ken and N. M. H. Carl, “A critical review of Bridgeless PFC boost rectifiers with common-mode voltage mitigation,” *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, vol. 2, pp. 3654–3659, 2016.
- [7] F. J. Regino Ubarnes, E. M. Ochoa, and A. L. Vergel, “CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL GENERALIZADO (GPI) PARA EL LAZO DE CORRIENTE DE UN CONVERTIDOR AC – DC BOOST BRIDGELESS,” *Rev. Ingenio UFPSO*, vol. 13, no. e-ISSN 2389-864X, pp. 49–56, 2017.
- [8] G. a. Ramos, J. Cortes-Romero, and A. J. Triana, “Control proporcional integral generalizado para señales periódicas,” *Tecnura*, vol. 17, pp. 18–32, 2013.
- [9] H. Wu, L. Zhang, J. Yang, and S. Li, “Model predictive control for DC-DC buck power converter-DC motor system with uncertainties using a GPI observer,” *Chinese Control Conf. CCC*, pp. 4906–4911, 2017.
- [10] “Compliance Testing to the IEC 1000-3-2 (EN 61000-3-2) and IEC 1000-3-3 (EN 61000-3-3) Standards.” [Online]. Available: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5964-1917E.pdf>. [Accessed: 07-Nov-2015].
- [11] A. Lazaro, A. Barrado, M. Sanz, V. Salas, and E. Olias, “New Power Factor Correction AC-DC Converter With Reduced Storage Capacitor Voltage,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 1, pp. 384–397, Feb. 2007.
- [12] “IEEE Std 519-1992,” *IEEE Std 519-1992*. pp. 1–112, 1993.



Diseño de un Control LQG y un Control Robusto para un Sistema TORA

Design of an LQG Control and Robust Control for a TORA System

Juan Pablo Muñoz Vidal^{1, γ}, Hernando González Acevedo¹

1. Santander, Universidad Autónoma de Bucaramanga,
Bucaramanga, Colombia

γ. Autor corresponsal: jmunoz435@unab.edu.co, hgonzalez7@unab.edu.co

Resumen

Tora es un oscilador de traslación con un actuador rotacional, que presenta un comportamiento no lineal. Para este paper, se simplifica el modelo bidimensional y se lleva a cabo la linealización del sistema para aplicar un control de seguimiento utilizando la técnica de control lineal LQG y QFT, identificando la mejor estrategia que se puede presentar para este problema.

Palabras claves: Control LQG, Control Robusto, Sistema TORA

Abstract

Tora is a translation oscillator with a rotary actuator, which presents a non-linear behaviour. For this paper, the two-dimensional model is simplified and the system linearization is carried out to apply a follow-up control using the linear control technique LQG and QFT, Identifying the best strategy that can be presented for this problem.

Keywords: LQG controller, QFT controller, TORA system

Introducción

El problema de regulación de la salida es uno de los más importantes problemas en la teoría de control. Incluye los problemas de seguimiento de señales de referencia y rechazo de perturbaciones generadas por un sistema autónomo externo.

El oscilador traslacional con rotación del actuador (TORA) es un sistema no lineal de referencia ampliamente estudiado. Pertenece a una clase de sistemas no lineales subactuados y es considerado como una versión simplificada de las aeronaves de doble giro. La interacción entre la rotación y la traslación en el sistema TORA es similar a la interacción entre giro y nutación en una nave espacial de doble giro. El sistema consta de un carro de oscilación de traslación no accionada y un rotor excéntrico accionado unido al carro. El problema de la estabilización de sistema TORA incluye la aplicación de la entrada de control del par que actúa sobre el rotor para estabilizar tanto la posición de traslación del carro oscilante no accionada y la posición de rotación del rotor excéntrico accionado. [1]

El propósito de este trabajo es analizar el comportamiento de las estrategias de control LQG y QFT en un sistema TORA, comparando las dos estrategias de control y concluyendo cuál es la mejor técnica para este sistema.

Este sistema es un sistema mecánico de referencia utilizado para probar muchas técnicas de control basadas en un diseño de control para sistemas no lineales, Ejemplo de estas son: Integrator Backstepping [2], Diseño De Control Basado En Energía ([3], [4]), Lógica difusa ([5], [6], [7], [8]), Control De Conmutación [9], Control Deslizante [10], Control Por Espacio De Estados Con Retroalimentación No Lineal([11], [12]), Control De Estabilidad De Tiempo Finito Basado En El



Modo Deslizante [13], PD Óptimo [14], Formación Y Reducción Del Caos En Transformaciones Robustas De Punto Fijo Basadas En El Control Adaptativo [15] y Control Basados En Cascada Y En Pasividad [16].

Los artículos [17] y [18] presentan una validación experimental. En la investigación [17] se implementó un controlador por retroalimentación de estado no lineal H con el que se buscó suprimir las oscilaciones del sistema en este no se consiguió este objetivo y siempre se presentaba una oscilación de muy bajas amplitud mientras que en la investigación [18] se presentó una respuesta la cual conseguía estabilizar el sistema con un control de retroceso adaptable dando como resultado un control adecuado para el sistema.

Dinámica del modelo

En el oscilador traslacional con rotación del actuador (TORA) de la figura 1 se presenta un sistema que consiste en un carro de masa M que se adjunta a una pared con un resorte de rigidez K . El carro puede presentar una perturbación por una fuerza externa fuerza F_d . En el centro del carro, se presenta un brazo giratorio de masa m , el brazo tiene una inercia J el cual esta accionado por un par de control T_u . El carro y el brazo se mueven en el plano horizontal y, por lo tanto, se omiten los efectos de la gravedad. El desplazamiento horizontal del carro se denota por e y el desplazamiento angular del brazo se denota por θ .

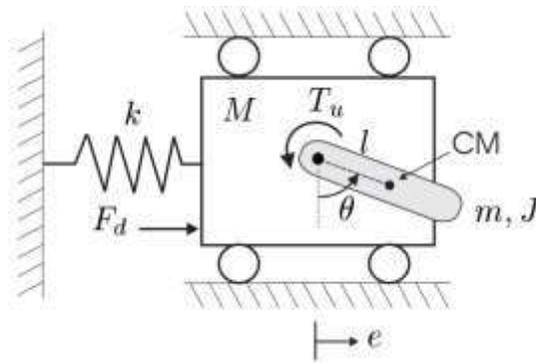


Figura 1. Ilustración del Sistema TORA [17]

Las ecuaciones que representan el comportamiento del sistema están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\bar{M} * \ddot{e} + m * L * (\ddot{\theta} \cos \theta - \dot{\theta}^2 \sin \theta) + k * e = F_d \quad (1)$$

$$J * \ddot{\theta} + m * L * \ddot{e} * \cos \theta = T_u \quad (2)$$

donde \bar{M} :

$$\bar{M} = M + m \quad (3)$$



Estas ecuaciones son iguales a analizar la energía cinética del sistema debido a que solo se mueve horizontalmente. En la tabla 1 se observa el valor de los parámetros que se tienen en cuenta en el desarrollo del modelo dinámico, estos valores fueron tomados del artículo [17] el cual fue tomado como referencia para el modelo dinámico.

PARÁMETROS DEL OSCILADOR TRASLACIONAL CON ROTACIÓN DEL ACTUADOR

Símbolo	DESCRIPCIÓN	Unidades
M	Masa cuadrada	20.965 [Kg]
mL	Multiplicación de la masa y la longitud del eslabón	1.3389 [Kg*m]
J	Masa muslo Superior	0.4270 [N*m ²]
K	Constante del resorte	500[N/m]

Los estados del sistema vienen representados de la siguiente manera: $x_1 = \dot{e}$, $x_2 = e$, $x_3 = \dot{\theta}$, $x_4 = \theta$. Se considera como punto de equilibrio $e = 0$, $\dot{e} = 0$, $\theta = 0$ y $\dot{\theta} = 0$. Con base a esto se realizó un modelo lineal para realizar el diseño de los diferentes controladores a trabajar.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{J * K}{mL^2 - J * M} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K * mL}{mL^2 - J * M} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{J}{mL^2 - J * M} & \frac{mL}{mL^2 - J * M} \\ 0 & 0 \\ \frac{mL}{mL^2 - J * M} & M1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$



Técnica de control por espacio de estados

El principio básico del diseño de un sistema de control por espacio de estados es determinar dos matrices de ganancias, K y K_i , la primera que multiplique a los estados del sistema y la segunda al integrador ubicado en el camino directo entre el comparador de error y la planta, tal como se observa en la figura 2.

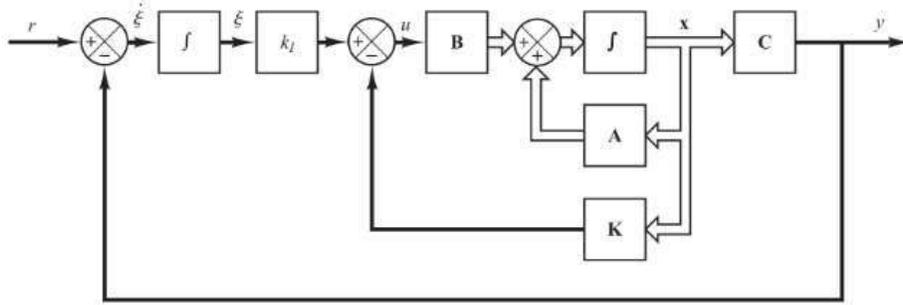


Figura 2. Diagrama de bloques del sistema de seguimiento [19]

Supóngase que la entrada de referencia (función escalón) se aplica en $t = 0$. En este caso, para $t > 0$, la dinámica del sistema se describe mediante la siguientes ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\xi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(t) \quad (8)$$

Se diseñará un sistema asintóticamente estable, tal que $x(\infty)$, $\xi(\infty)$ y $u(\infty)$ tiendan, respectivamente, a valores constantes. Así, en estado estacionario, $\dot{\xi}(t) = 0$ y se obtiene $y(\infty) = r$. Obsérvese que, en estado estacionario, se tiene que:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(\infty) \\ \dot{\xi}(\infty) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(\infty) \\ \xi(\infty) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(\infty) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(\infty) \quad (9)$$

Considerando que $r(t)$ es una entrada escalón, se tiene que $r(\infty) = r(t) = r$ (constante) para $t > 0$. Haciendo la resta de la ecuación (8) menos la ecuación (9), se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) - \dot{x}(\infty) \\ \dot{\xi}(t) - \dot{\xi}(\infty) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) - x(\infty) \\ \xi(t) - \xi(\infty) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} [u(t) - u(\infty)] \quad (10)$$

Para simplificar la Ecuación (10) definimos los siguientes términos:

$$x(t) - x(\infty) = x_e(t) \quad (11)$$

$$\xi(t) - \xi(\infty) = \xi_e(t) \quad (12)$$

$$u(t) - u(\infty) = u_e(t) \quad (13)$$

Entonces, la Ecuación (10) se puede escribir como:



$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e(t) \\ \dot{\xi}_e(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e(t) \\ \xi_e(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u_e(t) \quad (14)$$

Donde también:

$$u_e(t) = -Kx_e(t) + K_I \xi_e(t) \quad (15)$$

Se define un nuevo vector de error $e(t)$ de dimensión $(n + 1)$ mediante:

$$e(t) = \begin{bmatrix} x_e(t) \\ \xi_e(t) \end{bmatrix} = (n + 1) - \text{vector} \quad (16)$$

Así, la Ecuación (14) se transforma en:

$$\dot{e} = \hat{A}e + \hat{B}u_e \quad (17)$$

Donde:

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

y la Ecuación (15) se convierte en:

$$u_e = -\hat{K}e \quad (20)$$

Donde:

$$\hat{K} = [K \quad -K_I] \quad (21)$$

Control LQG (linear quadratic gaussian control)

El controlador LQG es la combinación de una ganancia de realimentación de estados y un estimador de estados, tipo Kalman [20]. El primer paso para el diseño del controlador LQG es determinar una matriz de ganancias \hat{K} que minimice la función de costo J , ecuación (22). Las matrices Q y R son matrices definidas positivas, generalmente diagonales, que determinan el equilibrio entre el seguimiento de una trayectoria por parte de los estados y la energía de la señal control requerida por el sistema para alcanzar los objetivos de control deseados. Para calcular \hat{K} se usa una función de costo cuadrática que minimiza el siguiente índice de desempeño:

$$J(u) = \int_0^{\infty} (e^T Q e + u_e^T R u_e) dt \quad (22)$$



Donde Q y R son constantes que le dan peso a la minimización de e y u_e , respectivamente. La minimización de la Ecuación (22) lleva a la necesidad de resolver la ecuación algebraica de Ricatti para la matriz de Ricatti P . El Filtro de Kalman tiene la siguiente estructura:

$$\hat{X} = A\hat{x} + Bu + L(y_v - \hat{y}) \quad (23)$$

Donde \hat{x} es el vector de estados estimados, \hat{y} es la aceleración estimada de la estructura y L es la ganancia del observador. Esta ganancia se halla mediante un índice de desempeño que minimiza la covarianza del error de estimación. Finalmente, el controlador LQG puede ser unificado en una representación por espacio de estados:

$$A_c = \begin{bmatrix} A - B * Kest - L * C + L * D * Kest & B * KI - L * D * KI \\ \text{zeros}(1,2) & \text{zeros}(1,1) \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$B_c = \begin{bmatrix} \text{zeros}(2,1) & L \\ \text{eye}(1) & -\text{eye}(1) \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$C_c = [-Kest \quad KI] \quad (26)$$

$$D_c = [\text{zeros}(1,2)] \quad (27)$$

Para el diseño del sistema de control LQG se definen las siguientes matrices diagonales Q y R .

$$Q = \text{diag}[(0.01,0.01,0.01,0.5,0.5)] \quad (28)$$

$$R = 100 \quad (29)$$

Al solucionar la ecuación de Riccati, se obtiene la matriz \hat{K}

$$\hat{K} = [1.444,0.788,0.479,0.269, -0.07] \quad (30)$$

Para el sistema del observador se asumen las siguientes varianzas:

$$Q_n = 0.001^2 \quad (31)$$

$$R_n = 0.001^2 \quad (32)$$

A partir de estos valores se obtiene la matriz L :

$$L = \begin{bmatrix} -1.2865 \\ -0.2485 \\ 27.4533 \\ 7.4099 \end{bmatrix} \quad (33)$$

El sistema en lazo cerrado presenta un tiempo de establecimiento de 11.9 [s] para el brazo del eslabón en el centro del carro, respectivamente, y con un sobre paso menor del 6 %.



Control Robusto Cuantitativo QFT

La teoría del control de retroalimentación cuantitativa (QFT) es un método de ingeniería de control que propone explícitamente el uso de la realimentación para reducir simultáneamente los efectos de la incertidumbre de la planta y satisfacer las especificaciones de comportamiento deseadas. El método hunde sus raíces en el control clásico frecuencial propuesto por [20], cuando existe incertidumbre en el modelo de la planta o cuando hay perturbaciones no medidas actuando sobre la misma. Presentado una estructura la cual considera las posibles perturbaciones al sistema (figura 3) donde podemos obtener una relación entre la salida/entrada dada en las ecuaciones (34).

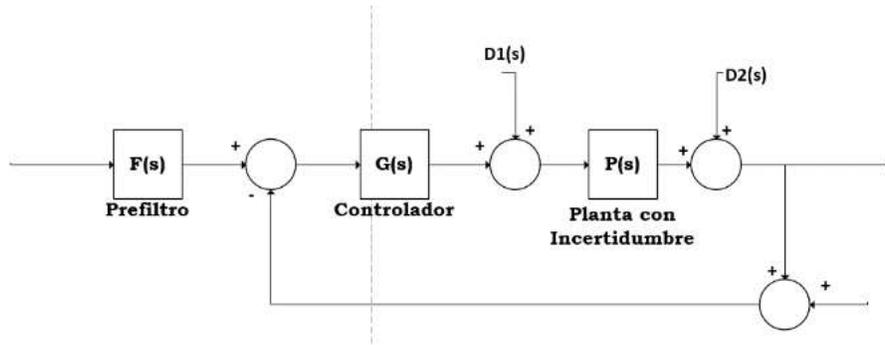


Figura 3. Estructura genérica de control QFT [Autor]

$$Y = \frac{P}{1 + P * G} * D_1 + \frac{1}{1 + P * G} * D_2 + \frac{P * G}{1 + P * G} * (F * R - N) \quad (34)$$

Podemos expresar la estabilidad robusta del controlador como:

$$\left| \frac{L(j\omega)}{1 + L(j\omega)} \right| \leq \delta_u, \text{ Para toda } P \in \wp, \omega_{iU} \in [0, \infty] \quad (35)$$

Siendo $L = G \cdot P$ y δ_u una tolerancia constante para todas las frecuencias. El controlador G será el responsable de adecuar la sensibilidad de lazo cerrado debida a variaciones en $|P|$, a la tolerancia δ_u , en cada una de las frecuencias discretas ω_{iU} . La estabilidad debe garantizarse en el intervalo global de frecuencias de trabajo del sistema.

El cumplimiento de la desigualdad en la ecuación (35) impone un máximo sobreimpulso en la respuesta temporal y frecuencial del sistema en lazo cerrado, esto equivale a imponer un valor mínimo en el coeficiente de amortiguamiento de los polos dominantes en lazo cerrado. Al mismo tiempo, garantiza unos márgenes de fase y ganancia mínimos para todas las plantas $P \in \wp$, índices con los que el control clásico mide el grado de estabilidad de un sistema. Dichos márgenes pueden calcularse de forma simple a partir de la tolerancia δ_u como sigue [21]:

$$MF \geq 180^\circ - \arccos\left(\frac{0.5}{\delta_u^2} - 1\right) \quad (36)$$



$$MG \geq 1 + \frac{1}{\delta_U} \quad (37)$$

Como criterio general de diseño para obtener una estabilidad relativa aceptable, [22] aconseja unos márgenes mínimos de fase y ganancia de 45° y 1.77 (o $5dB$), respectivamente. Aplicando la ecuaciones (36) y (37) resulta un mínimo $\delta_u = 1.3$ en términos de QFT. Este criterio fue tomado para el diseño de nuestro controlador.

El diseño del controlador QFT, $G(s)$, se lleva a cabo sobre el Diagrama de Nichols (NC) en el que se han representado los contornos para cada ω_i , $B(j\omega_i)$, y la planta nominal $P_0(j\omega_i)$. Los contornos expresan la mínima posición a alcanzar por la planta nominal de lazo abierto para cumplir las especificaciones de lazo cerrado que ya incluyen la incertidumbre. De este modo, con la técnica de síntesis o loop-shaping se añaden elementos ganancia, polos y ceros tal que la planta nominal de cada frecuencia satisfaga su correspondiente contorno, (se sitúe por encima o por debajo, según especificaciones). Esto garantizará que ninguna planta P en $\{P\}$ de las previstas en el modelado violará las especificaciones planteadas. A partir de lo anterior de diseño un controlador $G(s)$ (ecuación 38):

$$G(j\omega) = 0.1354 * \frac{s}{s + 1} \quad (38)$$

El prefiltro $F(j\omega)$ aportará la magnitud necesaria en cada frecuencia. Reducida la sensibilidad frente a incertidumbre con el controlador, el prefiltro permite modelar en cada frecuencia el comportamiento del lazo cerrado según la especificación robusta requerida en el seguimiento de señales. Para el sistema TORA se planteado el prefiltro $F(j\omega)$ (ecuación 39):

$$F(j\omega) = \frac{0.1652 * s + 1}{0.07356 * s + 1} \quad (39)$$

Como resultado se presentó la estructura de un controlador y un prefiltro obteniendo un tiempo de establecimiento de $11.5[seg]$ para el eslabón en centro del carro del oscilador traslacional con rotación del actuador.

Resultados de simulación

En la herramienta de simulink se implementa el modelo no lineal con cada una de las estrategias de control y se evalúan los índices de error ante una entrada escalón. En la figura 4 se presenta el diagrama de bloques implementado para evaluar el controlador LQG obtenido y en la figura 5 se observa la implementación del controlador QFT adquirido.

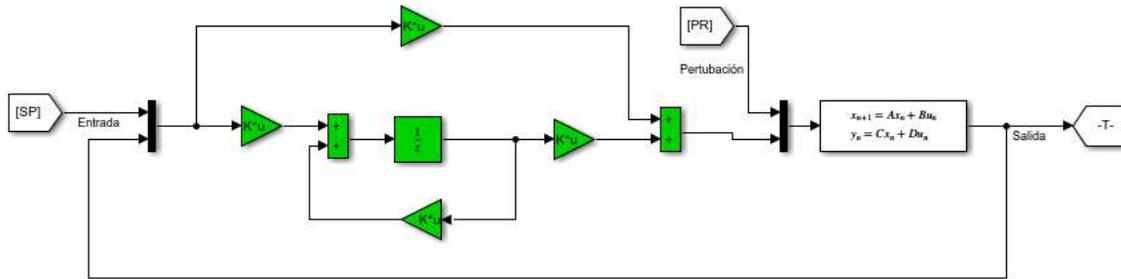


Figura 4. Implementación en simulink del controlador LQG (bloques verdes representan a el controlador) [Autor]

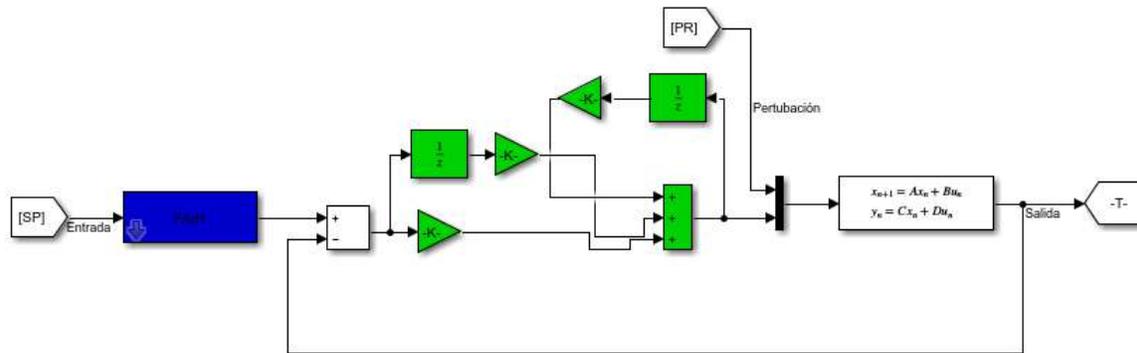


Figura 5 Implementación en simulink del controlador QFT (los bloques verdes representan a el controlador y el bloque azul a el filtro del sistema) [Autor]

Los índices de error que se tomaron en cuenta fueron: integral del error absoluto (IAE), integral del error cuadrático (ISE), integral del tiempo por el error absoluto (ITAE) e integral del tiempo por el error cuadrático (ITSE), definidos por las ecuaciones 40 a 43, donde $e(k)$ es el vector del error y $t(k)$ el vector de tiempo [23].

$$ISE = \sum_{k=0}^{\infty} e(k)^2 \quad (40)$$

$$ITSE = \sum_{k=0}^{\infty} t(k)e(k)^2 \quad (41)$$

$$IAE = \sum_{k=0}^{\infty} |e(k)| \quad (42)$$

$$ITAE = \sum_{k=0}^{\infty} t(k)|e(k)| \quad (43)$$



Se simuló el sistema ante una entrada escalón de $\frac{\pi}{2}$ [rad] (figura. 6 y se calcularon los diferentes índices de error que se presentan en la tabla 2.

ÍNDICES DE ERRORES (IAE, ITAE, ISE, ITSE)				
Variables Yi	IAE	ITAE	ISE	ITSE
Control LQG	0.373	0.683	4.14	1.474
Control QFT	0.27	0344	2.519	1.116

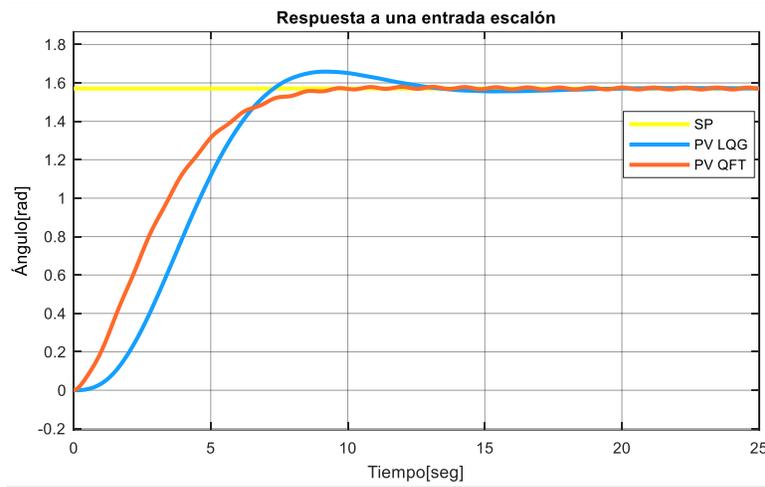


Figura 6. Respuesta a una entrada escalón, línea roja control LQG y línea amarilla un control QFT[Autor]

Es importante tener en cuenta que para el sistema TORA, se debe considerar la respuesta del modelo ante una perturbación, la cual se define como una fuerza externa Fd . En la figura 7 se presenta la simulación del sistema, para variaciones de la señal de referencia entre $-\pi$ [rad] a π [rad] y en la figura 8 la fuerza externa aplicada variable en un rango entre -80 [N] a 80 [N].

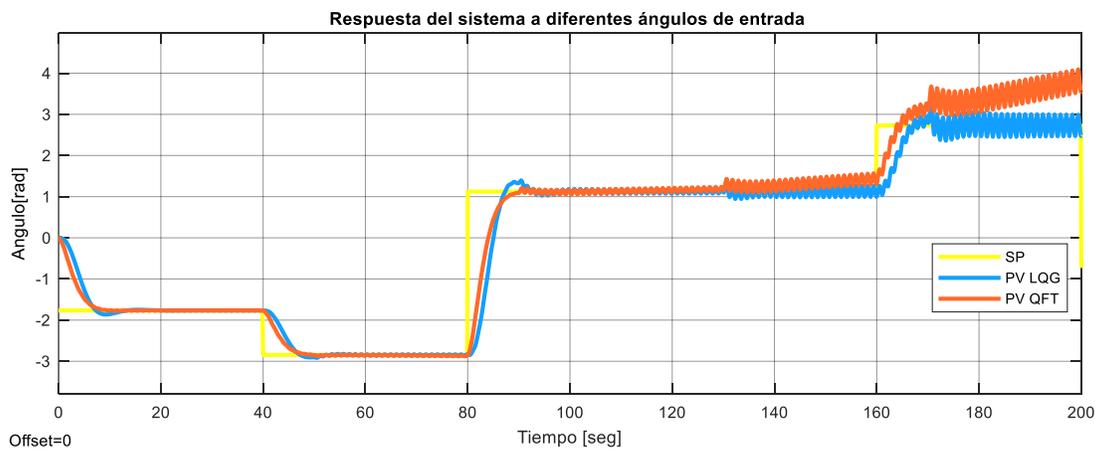


Figura 7. Respuesta del sistema ante una entrada de referencia variable[Autor]

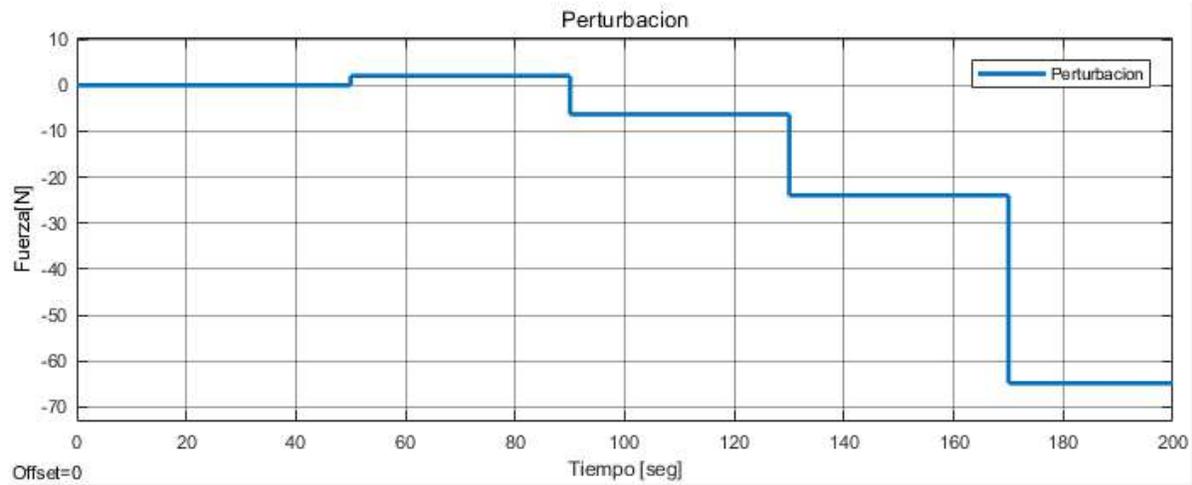


Figura 8. Perturbación aplicada a el sistema de referencia variable [Autor]

Se presentó que para los dos controladores aplicados al realizar una perturbación mayor a los 6 [N] se presenta una oscilación. Entre mayor sea la fuerza de perturbación, el modelo se aleja del punto sobre el cual se linealizó y las técnicas de control lineales que se implementaron no son capaz de regular el sistema. Por esta razón los resultados de la simulación presentan un comportamiento estable hasta un tiempo de 120 sg, después de este tiempo la perturbación es mayor inestabilizando el sistema.

Conclusiones

Se concluye que el controlador LQG de dos grados de libertad es el adecuado para el sistema TORA debido a que presenta un menor consumo de energía y de acuerdo a los resultados de la figura 7, reacciona eficientemente a variaciones bajas de la señal de perturbación. El sistema presenta inestabilidad para un señal de perturbación mayor a los 6 [N], por lo tanto se recomienda estudiar técnicas de control no lineal con el objetivo de compensar este efecto.

Referencias

- [1] N. K. a. A. Y. Memon, «Output Feedback Control of TORA - A Benchmark» *IEEE*, 2017.
- [2] G. S. o. t. O. E. Roto, «CHIH-JIAN WAN, DENNIS S. BERNSTEIN *, and VINCENT T. COPPOLA» *Department of Aerospace Engineering, The University of Michigan, Ann Arbor, MI 48/09-2118, U.S.A*, 21 February 1995.
- [3] X. Z. H. C. J. Z. Bingtuan Gao, «Energy-Based Control Design of an Underactuated 2-Dimensional TORA System» *The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, October 11-15, 2009 St. Louis, USA.
- [4] X. X. a. T. Y. Kaoru Sumida, «Analysis of the Simultaneous Control of Energy and Actuated Variable of TORA with Pendulum» *Proceedings of 2013 IEEE. International Conference on Mechatronics and Automation*, Kaoru Sumida, Xin Xin, and Taiga Yamasaki Okayama Prefectural University 111 Kuboki, Soja, Okayama, 719-1197, Japan.



- [5] J. Y. Chengdong Li, «Control of the TORA System Using SIRMs based Type-2 Fuzzy Logic» *Member, IEEE and Dongbin Zhao, Member, IEEE, FUZZ-IEEE 2009, Korea, August 20-24, 2009.*
- [6] W.-J. C. a. Y.-H. Lin, «An Approach to Robust Fuzzy Control for TORA Systems with Takagi-Sugeno Fuzzy Model Subject to Multiple Constraints» *Department of Marine Engineering National Taiwan Ocean University Keelung 202, Taiwan, R. O. C.*
- [7] K. U. K. I. J.-T. T. K. U. K. I. J.-H. O. W. D. U. D. N. U. Kazuo Tanaka, «Model-based Fuzzy Control of TORA System: Fuzzy Regulator and Fuzzy Observer Design via LMIs that Represent Decay Rate, Disturbance Rejection, Robustness, Optimality» *1998 IEEE.*
- [8] W. C. S. Wu, «State Variance Constrained Fuzzy Controller Design for Nonlinear TORA Systems with Minimizing Control Input Energy» *Proceedings of the 1003 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Taipei, Taiwan, September 14-19, 2003.*
- [9] S.-L. W. a. H.-S. C. Pang-Chia Chen*, «The Smooth Switching Control for TORA System via LMIs» *2010 8th IEEE International Conference on Control and Automation, Xiamen, China, June 9-11, 2010.*
- [10] J. L. X. a. B. G. Yuqing Bao, «On Hierarchical Sliding Mode Control of Underactuated TORA System» *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation, July 6-8, 2012, Beijing, China.*
- [11] R. K. B. M. M. D. M. S. D. S. G. B. a. A. D. Shubhobrata Rudra, «Design of Nonlinear State Feedback Control Law for Underactuated TORA System: A Block Backstepping Approach» *Electrical Engineering Department, Jadavpur University, Kolkata-700032, India, International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO 2013).*
- [12] O. F. C. o. T. -. A. B. U. N. System, «Nasir Khalid† and Attaullah Y. Memon‡» *2017 IEEE.*
- [13] Q. W. Y. L. Jie Yang, «Finite Time Stability Control Based on Higher-Order Sliding Mode for TORA System» *School of Automation Beijing Institute of Technology, Beijing, 2013 IEEE.*
- [14] X. X. a. T. Y. Kaoru Sumida, «Optimal PD Control Design via Dominant Pole Assignment for a Class of TORA Systems» *Proceedings of the 2014 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Chuo University, Tokyo, Japan, December 13-15, 2014.*
- [15] R. F. P. T. B. D. f. M. R. A. C. o. a. M. T. System, «Jozsef K. Tar, Terez A. Varkonyi, Levente Kovacs, Imre J. Rudas and Tamas Haidegger» *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), September 14-18, 2014, Chicago, IL, USA.*
- [16] D. F. a. P. V. K. Mrdjan Jankovic, «Cascade- and Passivity-Based Control Designs» *IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, Vols. %1 de %2 VOL. 4, NO. 3, MAY 1996.*
- [17] B. J. N. v. d. W. a. H. N. Alexey Pavlov, «Experimental output regulation for the TORA system» *IEEE.*



- [18] M. I. a. S.-K. C. Ching-Hung Lee, «Intelligent Controller Design and Experimental Implementation of Nonlinear TORA System» *2009 IEEE International Conference on Control and Automation*, Christchurch, New Zealand, December 9-11, 2009.
- [19] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, Madrid (España): 5 PEARSON EDUCACIÓN, S.A, 2010.
- [20] H. Bode, «Network Analysis and Feedback Amplifier Design» Van Nostrand, NY, 1945.
- [21] Y. a. O. Y. Chait, «Multiple input/single output computer-aided control design using the quantitative feedback theory» *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. Vol. 3,pp.47-54, 1993.
- [22] B. G, «Principles of Feedback Control» *Wiley*, vol 1, 1988.
- [23] R. B. P. C. Padraig Basquel, «Optimal closed-loop transfer functions for non-standard performance indices» de *2017 28th Irish Signals and Systems Conference (ISSC)*, Killarney, 2017.
- [24] R. Burns, «Advanced Control Engineering» Ed.Butterworth Heinemann., ISBN 0750651008, p. 288 – 299, 2001.



Análisis de la Extrusión Directa de una Probeta de Aluminio 6061 Utilizando el Método de Elementos Finitos

Analysis of the Direct Extrusion of a 6061 Aluminum Specimen Using the Finite Element Method

Esneider Cardona Buitrago^{1,γ}, Luis Carlos Flórez García¹, Carlos Andrés Mesa Montoya¹

1. Risaralda, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia
γ. Autor correspondal: esncardona@utp.edu.co

Resumen

En este artículo se estudia el comportamiento de los esfuerzos generados en el aluminio 6061 durante el proceso de extrusión directa en frío utilizando el método de elementos finitos. Se utiliza el aluminio 6061 como material de trabajo (tocho), el cual es totalmente deformable y para la cámara de extrusión se utiliza un material rígido. En este modelo se utiliza solo la mitad de la geometría para reducir el tiempo y la capacidad computacional.

Se analizaron los esfuerzos generados en el aluminio 6061 con una sección transversal circular sometido a extrusión directa en frío variando el radio del filete de entrada y salida del troquel, así como también el coeficiente de fricción asociado al tocho y la cámara de extrusión. Para este estudio se utilizaron condiciones de frontera tales como fricción asociada al tocho y la cámara extrusora y un respectivo displacement asociada al pistón que ejerce la fuerza sobre el aluminio 6061.

Dentro de los resultados se obtiene un sin número de datos por medio de las simulaciones realizadas con el método de elementos finitos para cada parámetro como fue el radio de filete interno y externo de la matriz; como también el coeficiente de fricción que se presenta entre el material de estudio y la cámara de extrusión. Con los datos obtenidos se realizan las diferentes curvas gráficas para su respectivo análisis de lo cual podemos concluir que la fuerza de extrusión disminuye al aumentar el radio de filete de salida de la matriz y que el esfuerzo cizallante es directamente proporcional al radio de salida de la matriz ya que a mayor radio; mayor es el esfuerzo generado en el tocho.

Palabras clave: extrusión directa, método de elementos finitos, fricción.

Abstract

In this article we studied the behavior of the efforts generated in aluminum 6061 in the direct cold extrusion process using the finite element method. Aluminum 6061 is used as a working material (billet), which is totally deformable, and a rigid material is used for the extrusion chamber. In this model, only half of the geometry is used to reduce time and computational capacity.

The efforts generated in aluminum 6061 with a circular cross section subjected to direct cold extrusion were analyzed by varying the radius of the fillet inlet and outlet of the die, as well as the coefficient of friction associated with the billet and the extrusion chamber. For this study, boundary conditions such as frictional associated with the billet and the extruder chamber and a respective displacement associated to the piston that exerts the force on aluminum 6061 were used.



Within the results, a number of data is obtained by means of the simulations performed with the finite element method for each parameter such as the internal and external fillet radius of the matrix; as well as the coefficient of friction that occurs between the study material and the extrusion chamber. With the obtained data the different graphical curves are made for their respective analysis of which we can conclude that the extrusion force decreases when increasing the fillet radius of the matrix and that the shear stress is directly proportional to the exit radius of the matrix since at higher radius; greater is the effort generated in the billet.

Keywords: direct extrusion, finite element method, friction.

Introducción

En los estudios desarrollados en el ámbito académico y científico sobre el proceso de conformado de materiales, se ven reflejados varios parámetros para optimizar en los procesos [3], tales como aumentar la calidad del producto final y la productividad. Por eso se realiza el análisis del comportamiento del material bajo la aplicación de diferentes métodos de conformado tales como: a) la extrusión directa, b) extrusión indirecta [6], c) extrusión mixta [2], d) hidrostática y e) extrusión por impacto; donde se busca combinar todos los procesos que permitan obtener piezas complejas y difíciles de fabricar y de mejor calidad [5], que si se utilizara otro tipo de proceso. El estudio de extrusión directa se ha basado en sus principales variables tales como la fuerza aplicada al material que se va a extruir (tocho). La velocidad con que se extruye, la temperatura generada por la fricción entre el material y la cámara [4]. El ángulo de ataque de los dados; y la zona muerta que se presenta entre el material y los dados al momento de realizar la extrusión; esto se debe a que el uso de la extrusión directa en frío tiene un gran campo de acción en el conformado de materiales. [12]

El proceso de extrusión es un proceso de conformado por compresión, en el cual el material de trabajo es forzado a fluir a través de una matriz para darle forma a su sección transversal [1] como se aprecia en la figura 1.



Figura 1. Extrusión directa

El proceso de extrusión directa es muy utilizado en la industria del conformado de materiales ya que con él se pueden conseguir un amplio rango de secciones extruidas con formas complejas como se puede observar en la figura 2 [14]. Estas secciones extruidas son imposibles de conseguir mediante otros métodos de conformado [6], los cuales tienen acabado superficial libre de corrosión y no necesita maquinado posterior, consiguiendo longitudes casi ilimitadas con una sección



transversal constante y unas propiedades mecánicas del material extruido mejoradas [7]. Las propiedades del material se ven mejoradas debido a que se reduce el tamaño del grano al forzar el material a salir por una sección más pequeña; lo que se conoce como endurecimiento por acritud [2]



Figura 2. Formas complejas obtenidas con el proceso de extrusión directa. Tomada del Groover. [1]

M. Cristóbal [9] realizan el análisis del proceso de extrusión directa de un tubo mediante el uso del método de elementos finitos (MEF) definiendo un valor específico para la velocidad de extrusión y el coeficiente de fricción para reducir los tiempos computacionales. En la práctica de extrusión de los materiales metálicos la forma geométrica del dado y su radio [8] contribuyen a la calidad adecuada de los productos y pueden influir en el desarrollo de procesos tecnológicos, tales como: a) la velocidad de extrusión, b) la presión, c) fricción y d) fuerza [11].

En investigaciones realizadas por N. Solomon [12]; se estudiaron diferentes tipos de matrices variando el ángulo de inclinación; donde se concluyó que la matriz de 90 grados era la más adecuada ya que tiene un coeficiente de fricción reducido entre el troquel y la matriz generando más turbulencia en el flujo del metal al pasar por la reducción al momento de extruir el metal [12].

En este artículo se realiza el estudio del redondeo del filete externo de la matriz y el coeficiente de fricción en una extrusión directa con un dado de 90 grados, para estudiar el comportamiento de la deformación, esfuerzo en la probeta, y la fuerza necesaria de extrusión sobre el material de trabajo (tocho). Esto con el fin de complementar los estudios realizados por N. Solomon and I. Solomon [11] [12].

Extrusión directa en frío

La extrusión directa en frío es un proceso de conformado plástico por compresión, en el cual el material de trabajo es forzado a fluir a través de la abertura de un dado para darle forma a su sección transversal [15]. El proceso se puede apreciar en la figura 1, el cual inicia con un tocho de metal que se introduce a un recipiente y un pisón comprime este material forzándolo a fluir a través de una o más aberturas que hay en un dado situado al extremo opuesto del recipiente [1]. Al aproximarse el pisón al dado, una pequeña porción del tocho permanece y no puede forzarse a través de la abertura del dado. [13].



En los estudios realizados sobre la extrusión directa una de las variables más representativas es la presión del pistón la cual se calcula de acuerdo con la Ec. 1. [2]

$$P = \sigma_y \left[E_x + \frac{2L}{D_o} \right] \quad (1)$$

donde:

P : Presión del embolo.

σ_y : Fluencia promedio durante la deformación. [MPa]

E_x : Deformación real de extrusión. [-]

L : Longitud del tocho. [mm]

D_o : Diámetro original del tocho. [mm]

El termino $2L/D_o$ representa la presión adicional asociada a la fricción.

La deformación real de extrusión está dada por la Ec. 2.

$$E_x = a + b(\ln r) \quad (2)$$

Donde a y b son constantes empíricas para el ángulo del dado y r es el radio del filete del dado; los valores típicos de las constantes a y b son 0,8 y 1,2 respectivamente.

Modelado

A. Descripción del modelo geométrico

El modelo para la extrusión directa consta de un material de trabajo (tocho) de dimensiones 58 mm de altura por 60 mm de diámetro como se muestra en la figura 3. Los demás componentes se toman como cuerpos rígidos indeformables donde no se verá ningún tipo de cambio en su estructura y geometría. Se realizan simulaciones en dos dimensiones con un modelo asimétrico. Las dimensiones de los elementos son aproximadas a las utilizadas en el estudio realizado por N. Solomon and I. Solomon. [12].

Debido a la forma asimétrica de los cuerpos, el modelo se reduce a un análisis de dos dimensiones, tomando solo la mitad de los cuerpos en el plano XY, tal y como se aprecia en la figura 3, lo cual busca reducir los cálculos y por tanto el tiempo computacional para solucionar los modelos.

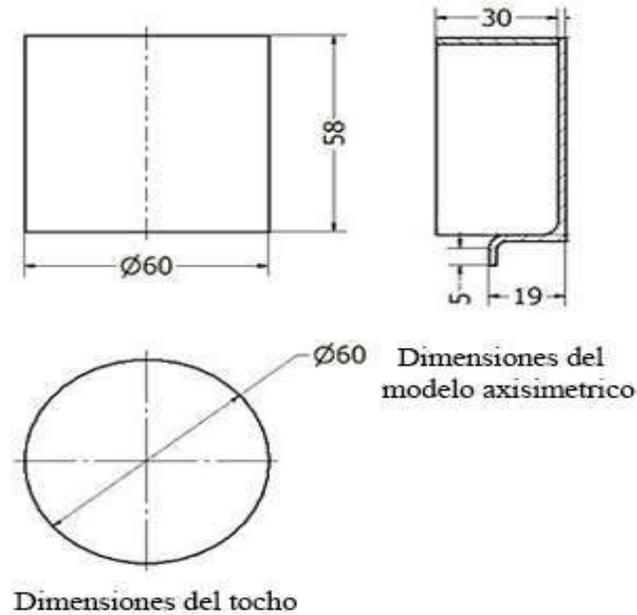


Figura 3. Plano del modelo geométrico. Medidas en Milímetros

B. Mallado del modelo

Para el estudio del material de trabajo (tocho) se realiza un análisis de independencia de malla para obtener una convergencia de datos que nos permita encontrar un tamaño de malla adecuado. Para hallar un valor óptimo de malla se varía el tamaño del mallado empezando en 1 mm y disminuyendo cada 0,05 mm para hallar un valor convergente que nos permita hacer los posteriores análisis de los parámetros de estudio y poder obtener mejores resultados en cada simulación.

Para el material de estudio el tocho se simula con un aluminio 6061 y se utiliza un modelo de elementos finitos con un tamaño de elemento discretizante de 0,4 mm, cuyo tamaño fue obtenido del análisis de independencia de malla que se aprecia en la Figura 4; y una función de región adaptativa no lineal; cuya aplicación fracciona los elementos con grandes deformaciones para generar nuevos elementos de mejor calidad en el elemento deformado, realizando un remallado durante el proceso de simulación y de esta manera arrojar resultados más confiables minimizando el porcentaje de error.

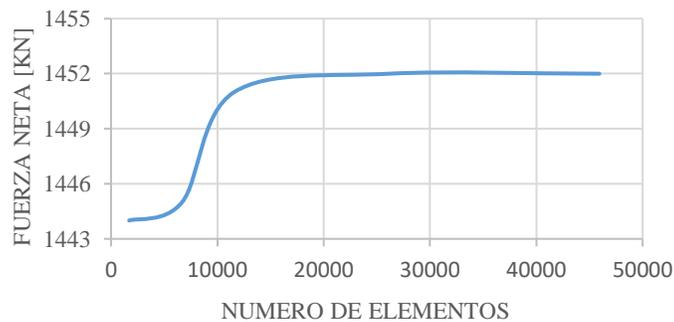


Figura 4. Independencia de malla



C. Caracterización del material

La caracterización del material utilizado en la simulación se realiza por medio de ensayos de tracción a diferentes probetas de aluminio 6061 de la misma procedencia, con el fin de encontrar las propiedades mecánicas necesarias para la simulación. Los ensayos consisten en someter una probeta a carga axial hasta la rotura registrando la deformación y la carga; las características buscadas son el módulo de Young, esfuerzo de fluencia y esfuerzo de rotura. Las probetas utilizadas se fabricaron con las dimensiones bajo el estándar ASTM E8.

A partir de los ensayos realizados, se construye la curva esfuerzo vs deformación real y la de ingeniería (ver figura 5), los cuales muestran el comportamiento elástico y plástico del aluminio a trabajar.

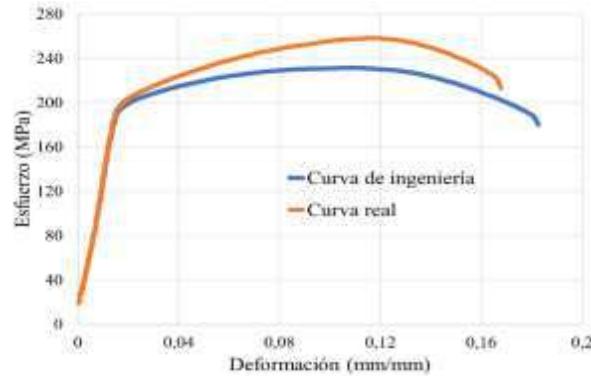


Figura 5. Curva esfuerzo vs deformación del material real e ingenieril

Con los datos obtenidos en los ensayos mecánicos, mediante el software ANSYS se determinan los cinco términos asociados al modelo de endurecimiento cinemático de Chaboche [10], (ver tabla 1), los cuales se utilizan para definir el comportamiento del material en el software.

Tabla 1. Coeficientes de Chaboche

C (MPa)	Valor	G (-)	Valor
C1	506,25	G1	16,68
C2	598,12	G2	121,01
C3	506,42	G3	16,83
C4	708,66	G4	121,04
C5	506,41	G5	16,55

Las propiedades mecánicas del aluminio trabajado se pueden observar en la tabla 2.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del material

Material	Esfuerzo Rotura	Esfuerzo Fluencia	Módulo Young	Relación Poisson
Unidad	MPa	MPa	GPa	-
Aluminio 6061	257,42	173,27	59,15	0,33



El modelo se utiliza debido a la aproximación que presenta con la curva real de deformación en la zona plástica, la cual se puede observar en la figura 6.

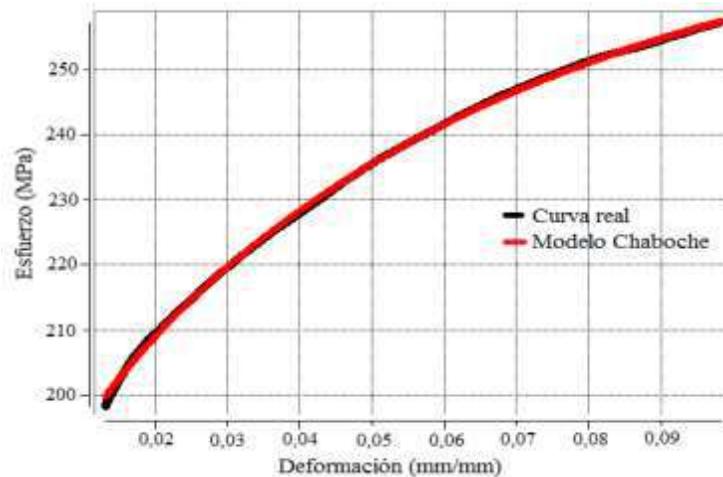


Figura 6. Curva esfuerzo vs deformación en la zona plástica del material

D. Condiciones de frontera

Para las condiciones de frontera del modelo axisimétrico fijamos la matriz por medio de coordenadas restringiendo su movimiento en los tres ejes y comportándose como un objeto rígido e indeformable, se fija el tocho al pistón con un contacto de tipo bound y a el pistón se le asigna un grado de libertad desplazándolo en el sentido negativo del eje y. Entre el tocho y la matriz se la asigna un contacto de tipo frictionless para las primeras simulaciones y después se asigna un contacto frictinal para variar y evaluar el coeficiente de fricción.

Resultados y discusión

Para realizar el estudio del comportamiento de extrusión directa se fueron variando los diferentes parámetros estudiados; tales como el radio del filete de entrada y salida de la matriz, como también el coeficiente de fricción asociado al tocho y la caja de la prensa de extrusión.

Se simulo el modelo con un desplazamiento máximo en el tocho de 5 milímetros en dirección al eje Y, obteniendo una deformación del material al pasar por la matriz, presentando como resultado final una reducción en el diámetro del tocho y a su vez un alargamiento longitudinal del mismo.

El primer parámetro analizado fue el radio del filete de salida el cual se simulo con diferentes radios comenzando en 0,5mm y aumentando cada 0,5mm hasta llegar a un radio máximo de filete de salida de 7mm; con este parámetro encontramos que la fuerza de extrusión se reduce a medida que aumenta el radio de salida de la matriz.

El segundo análisis se hizo variando el radio del filete interno de la matriz de extrusión tomando un valor inicial de radio de 3mm y aumentando cada 0,5mm para llegar a un valor final de 7,5mm de radio interno lo que nos demostró que la fuerza de extrusión disminuye a medida que se aumenta el radio interno de la matriz de extrusión.



Se realizaron diferentes simulaciones variando el coeficiente de fricción desde 0 (sin fricción), aumentando su valor cada 0,05 hasta alcanzar un máximo de 0,5.

Como podemos observar en la figura 7 el comportamiento del material extruido donde la zona de mayor esfuerzo en el tocho es aquella donde entra en contacto con el dado ya que es allí donde se genera mayor turbulencia del material y el esfuerzo mínimo se presenta al terminar el radio del filete interno de la caja de extrusión. Este comportamiento lo podemos visualizar en todos los radios evaluados (interno y externo).

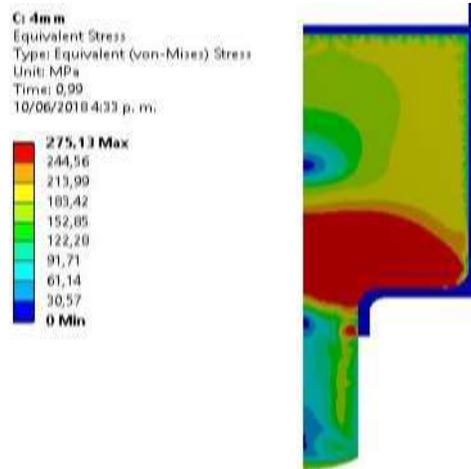


Figura 7. Esfuerzo equivalente Von Mises con un radio de filete interno y externo de 4mm

En la figura 8 podemos observar el esfuerzo cortante en el material extruido el cual se empieza a generar a medida que el material fluye a través del filete externo o de salida; y empieza a aumentar a lo largo del eje Y con un comportamiento ascendente alcanzando su máximo valor en la zona de turbulencia del material; y su mínimo esfuerzo al inicio del filete interno de la caja extrusora.

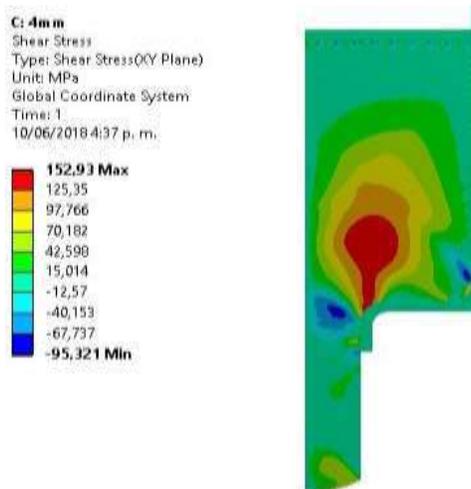


Figura 8. Esfuerzo cortante con un radio de filete interno y externo de 4mm



En la figura 9 podemos visualizar el comportamiento del esfuerzo normal del material de estudio el cual presenta un máximo esfuerzo en la zona de salida de la matriz de extrusión debido a que el tocho tiende a recuperar su forma inicial por lo cual el diámetro de salida del tocho es mayor que el diámetro de salida del dado.

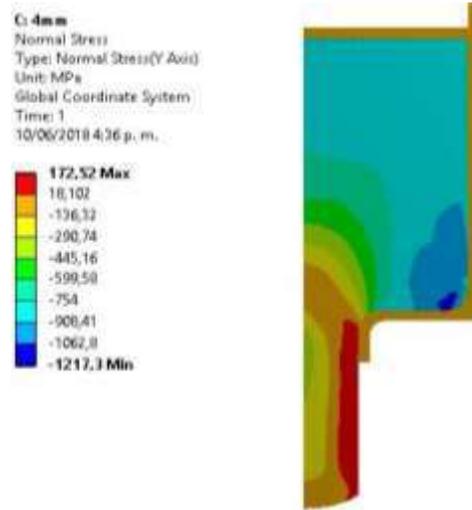


Figura 9. Esfuerzo normal con un radio de filete interno y externo de 4mm

Como podemos observar en la figura 10 se puede evidenciar que la deformación plástica total del material presenta su valor máximo cuando el material empieza a ser deformado en el cuello de salida de la matriz, mientras que la cabeza de salida del tocho no presenta deformación.

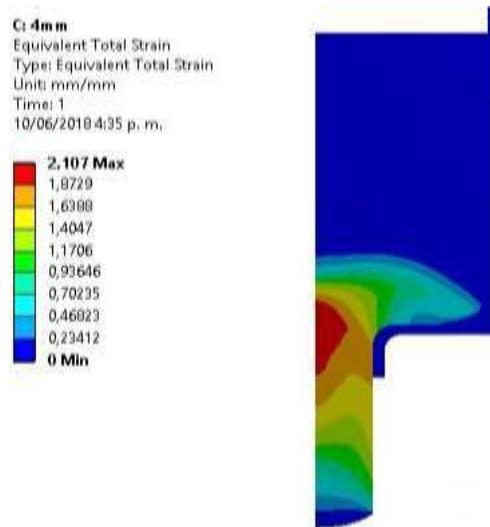


Figura 10. Deformación pastica total con un radio de filete interno y externo de 4mm



En la figura 11 podemos observar que la fuerza de reacción total disminuye a medida que aumenta el radio del filete de salida de la matriz de extrusión.

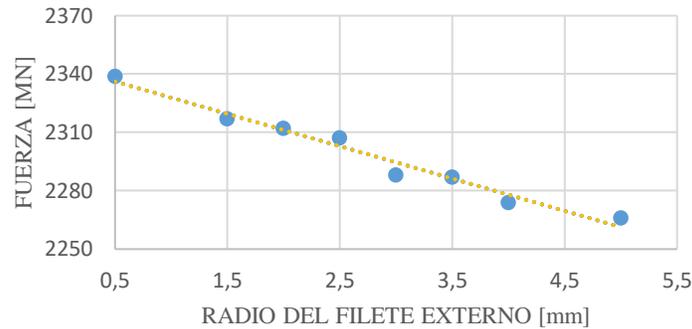


Figura 11. Fuerza vs radio del filete de salida de la matriz de extrusión

En la figura 12 observamos que el esfuerzo normal fluctúa con un cambio porcentual muy pequeño a razón del aumento del radio del filete de salida de la matriz.

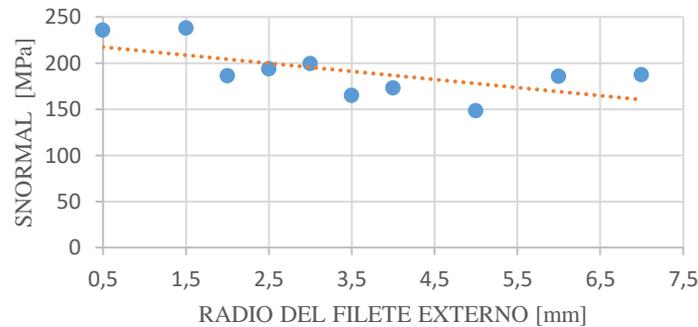


Figura 12. Esfuerzo normal vs radio del filete de salida de la matriz de extrusión

En la figura 13 visualizamos que el esfuerzo cortante es directamente proporcional al radio del filete de salida de la matriz con un cambio porcentual muy bajo.

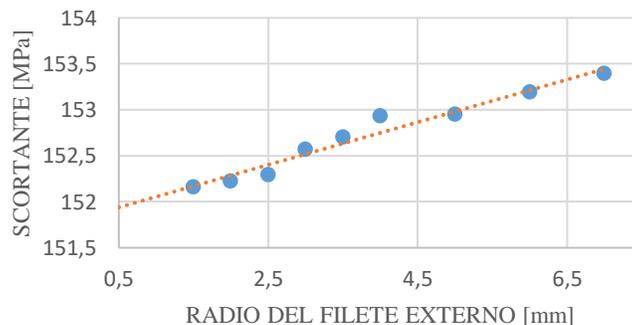


Figura 13. Esfuerzo cortante vs radio del filete de salida de la matriz de extrusión



En la figura 14 podemos visualizar como la fuerza aumenta a medida que aumenta el coeficiente de fricción, pero llega un momento donde tiende a converger a un mismo valor de fuerza para diferentes valores de fricción mostrando un comportamiento constante.

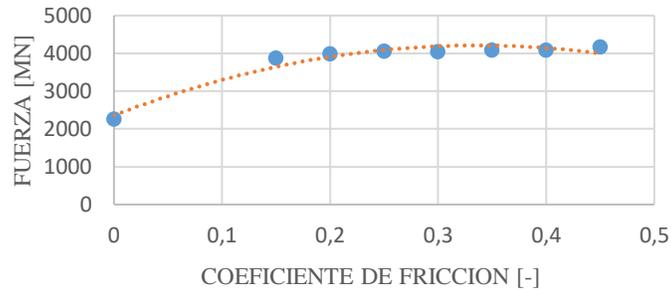


Figura 14 Fuerza vs coeficiente de fricción

El comportamiento del esfuerzo normal presenta una variación muy poca frente al coeficiente de fricción como lo podemos evidenciar en la figura 15.

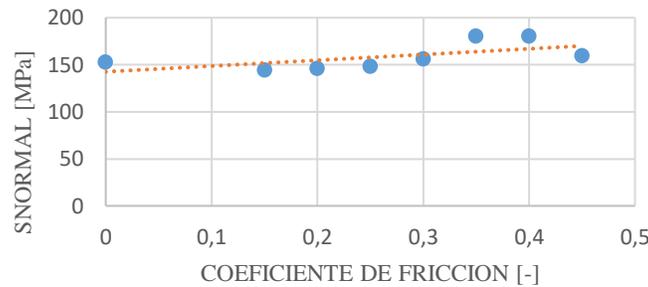


Figura 15 Esfuerzo normal vs coeficiente de fricción

En lo relacionado al esfuerzo cortante y el coeficiente de fricción podemos observar que es de tendencia ascendente para unos valores pequeños de fricción pero que a partir de un valor de 0,2 se mantiene con un comportamiento constante como podemos evidenciarlo en la figura 16.

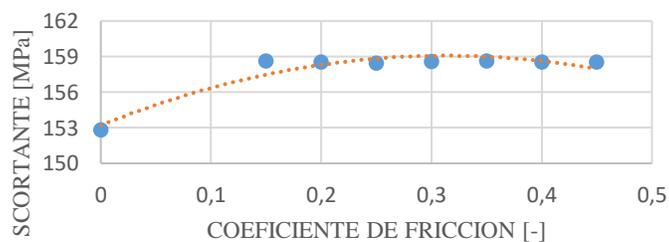


Figura 16 Esfuerzo cortante vs coeficiente de fricción



Relacionando la fuerza de extrusión con el radio interno del filete de la matriz podemos observar su comportamiento es inversamente proporcional donde a medida que el radio del filete interno aumenta la fuerza disminuye como podemos ver en la figura 17.

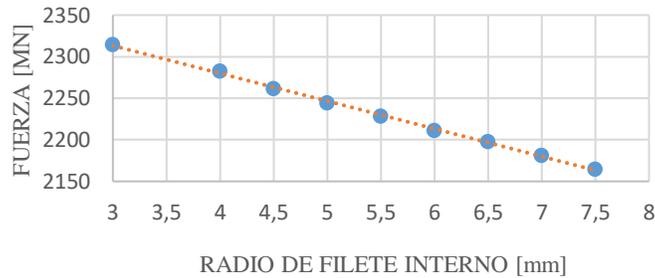


Figura 17. Fuerza Vs radio del filete interno de la matriz de extrusión

En la figura 18 podemos observar que el cambio del esfuerzo normal respecto a la variación del ángulo interno de la matriz presenta una variación porcentual mínima con un comportamiento lineal como nos muestra su respectiva línea de tendencia.

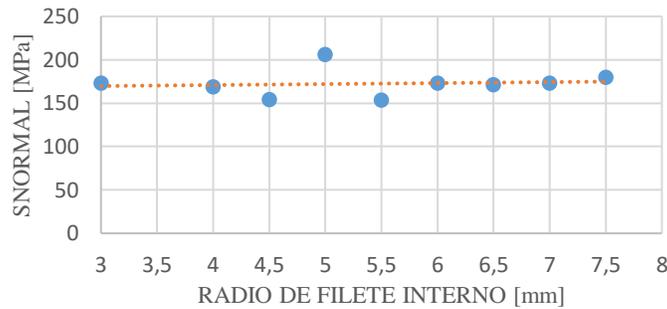


Figura 18. Esfuerzo normal Vs radio del filete interno de la matriz de extrusión.

En la figura 19 donde se enfrentan el esfuerzo cortante y el radio del filete interno observamos que son inversamente proporcionales ya que a medida que aumenta el radio del filete interno disminuye el esfuerzo cortante.

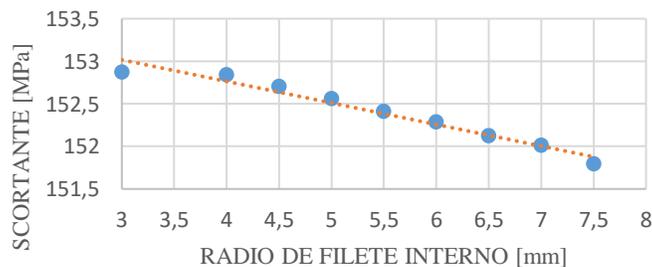


Figura 19. Esfuerzo cortante Vs radio del filete interno de la matriz de extrusión



Conclusiones

La fuerza de extrusión disminuye al aumentar el radio del filete de salida de la matriz, este comportamiento es el esperado debido a que el material pasa con menor esfuerzo al ingresar en la matriz.

El esfuerzo equivalente Von Mises permanece constante sin importar la variación tanto del radio del filete como también el coeficiente de fricción asociado al proceso de extrusión.

Se nota que el esfuerzo cortante o cizallante es directamente proporcional al radio del filete de salida de la matriz por lo que a mayor radio mayor es el esfuerzo que se genera en el material.

En el análisis realizado al radio del filete interno notamos que el esfuerzo cortante y la fuerza de extrusión son inversamente proporcionales al radio interno de la matriz de extrusión que sus valores disminuyen a medida que el radio interno de la matriz aumenta.

De acuerdo a los resultados presentados el esfuerzo normal máximo presenta un comportamiento lineal con una variación porcentual mínima el cual podemos concluir constante a medida que aumenta el radio del filete interno de la matriz ya que converge a un mismo valor.

Para futuras investigaciones se recomienda estudiar el ángulo de inclinación de la matriz teniendo en cuenta el radio de filete interno y externo para suavizar la salida del material, para determinar el efecto sobre la fuerza de empuje y el comportamiento del esfuerzo en el material deformado.

Referencias

- [1] M. P. Groover, *Fundamentos de la Manufactura Moderna*. Pearson Prentice Hall, Mexico, 2007.
- [2] M. Bedón and G. Estévez “Design and construction of a team for the direct inverse and mixed cold extrusion of non-ferrous metal profiles for the manufacturing processes laboratory of the DECEM;” 2012.
- [3] N. Hernan and N. Alberto, “Improvement of productivity in aluminium extrusion process with experimental aluminium alloy 6063 cast billets,” no. 35 pp. 11-25, 2017.
- [4] S. H. Kim, S. W. Chung, and S. Padmanaban, “Investigation of lubrication effect on the backward extrusion of thin-walled rectangular aluminum case with large aspect ratio,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 180, no. 1–3, pp. 185–192, 2006.
- [5] M. Plan, D. Movrin, D. Viloti, Z. Car, A. Ivanišević, and I. Ka, “an Analysis of Non-Axisymmetric Backward Extrusion,” pp. 953–957, 2012.
- [6] W. B. Bae, “An upper-bound analysis of the backward extrusion of internally elliptic-shaped tubes from round billets,” vol. 30, pp. 13–30, 1992.
- [7] W. B. Bae, “An upper-bound analysis of the backward extrusion of tubes of complicated internal shapes from round billets,” vol. 36, pp. 157–173, 1993.
- [8] A. Farhoumand and R. Ebrahimi, “Analysis of forward-backward-radial extrusion process,” *Mater. Des.*, vol. 30, no. 6, pp. 2152–2157, 2009.
- [9] M. Cristóbal, E.I. Ramírez, O. Ruiz, A. Ortiz; “Analysis of the process of direct extrusion of a tube by means of FEM,” 2016.



- [10] Simo, J.C. Hugles, T. J. R., *Computacional Inelasticity*, Springer, 1997.
- [11] N. Solomon. M. Teodorescu, I. Solomon And F. Popescu, “Danubia-Adria,” p. 211, 1998.
- [12] N. Solomon and I. Solomon, “Effect of die Shape on the metal flow pattern during Direct extrusion process,” 2010.
- [13] K. Gruening, “Extrusión en frío,” *Unfoternik*, no. 1, 1972.
- [14] G. E. Dieter and D. J. Bacon, *Mechanical metallurgy*. McGraw-Hill, 1988.
- [15] M. Plancak, “Backward Cold Extrusion of Aluminum and Steel Billets By Non-Circular Punch,” pp. 179–182, 2012.



Desarrollo de un Sistema de Digitalización 3D Usando Técnicas de Fotogrametría

Development of a 3D Scanning System Using Photogrammetry Techniques

Andrés M. Valencia¹, Ruth E. Cano^{2, γ}, José I. García²

1. Escuela de Ingeniería Sistemas, Universidad del Valle, Cali, Colombia
andres.valencia.restrepo@correounivalle.edu.co,

2. Grupo Interdisciplinario de Innovación Biotecnológica, Escuela de Ingeniería Mecánica,
Universidad del Valle, Cali, Valle, Colombia

γ. Autor correspondiente: ruth.cano@correounivalle.edu.co

Resumen

Este artículo presenta el desarrollo de un sistema de digitalización 3D usando técnicas de fotogrametría, con el propósito de proporcionar una herramienta de bajo costo y escalable para realizar la digitalización 3D de un cuerpo humano. Para esto, se planteó un procedimiento de diseño que integra teorías y herramientas, hardware y software. En este contexto, inicialmente, fueron definidos los requisitos que orientaron una posterior definición de un diseño conceptual, considerando aspectos de usabilidad y modularidad. La implementación de la solución priorizó el uso de dispositivos de captura de imágenes las cámaras Web digitales disponibles localmente y de bajo costo. Adicionalmente, las aplicaciones computacionales seleccionadas fueron desarrolladas bajo el concepto de uso libre. Para la evaluación de las propuestas fue definido un escenario de caracterización antropométrica (medidas dimensionales y volumétricas) de un cuerpo humano. Finalmente, se presenta una información relevante del desarrollo del trabajo

Palabras clave: fotogrametría, sistema de digitalización 3D.

Abstract

This article presents the development of a 3D digitalization system using photogrammetry techniques, with the purpose of providing a low cost and scalable tool to perform the 3D digitalization of a human body. For this, a design procedure was proposed that integrates theories and tools, hardware and software. In this context, initially, the requirements that guided a subsequent definition of a conceptual design were defined, considering aspects of usability and modularity. The solution implementation prioritizes the use of locally available and inexpensive digital image capture devices. Additionally, the selected computational applications were developed under the concept of free use. For the evaluation of the proposals, an anthropometric characterization scenario (dimensional and volumetric measurements) of a human body was defined. Finally, it presents relevant information on the development of the work

Keywords: photogrammetry, 3D scanning system.



Introducción

La digitalización de objetos se ha convertido en una herramienta cada vez más utilizada en diversas ramas de: ingeniería, control de calidad, medicina, arqueología, restauración de monumentos, entre otros. Los sistemas de digitalización que pueden encontrarse comercialmente usan distintas técnicas de digitalización las cuales se pueden agrupar en cuatro grupos: de contacto, sin contacto, activas y pasivas [1], [2].

En la Fig. 1 se muestran dos técnicas sin contacto comúnmente utilizadas, la primera utiliza tecnologías de triangulación mediante el uso de luz láser o infrarrojo conducente a determinar el intervalo de tiempo transcurrido entre la emisión y recepción del haz de luz. La segunda técnica trabaja con información tridimensional obtenida a partir de diversas imágenes bidimensionales solapadas. Mediante técnicas computacionales son determinados puntos comunes con los que se recrean un modelo digital 3D [3]. Una ventaja de esta técnica con respecto a la descrita inicialmente radica en la facilidad de adquisición de los dispositivos básicos de captura. Así, mientras la que utiliza un haz de luz requieren de equipos especializados para la digitalización y condiciones especiales de seguridad, la técnica de fotogrametría demanda el uso de cámaras digitales comerciales de fácil acceso. Según el proceso de digitalización, ambas técnicas requieren una etapa de procesamiento para la generación del modelo digital 3D del objeto deseado. El modelo generado frecuentemente debe ser refinado hasta alcanzar las características técnicas de resolución deseadas. Considerando la diversidad de aplicaciones de los modelos digitales 3D, la etapa de exportación debe considerar los formatos de intercambio aceptados internacionalmente, tales como: iges, stl, entre otros. En este artículo, se presenta un resultado parcial de un proyecto que pretende ampliar la cobertura de atención del servicio de rehabilitación física considerando la inclusión de las tecnologías de información y comunicación (TIC). Es decir, generar una infraestructura que permita la relación conducente a la rehabilitación entre un profesional de la salud y una persona que presenta una discapacidad física independientemente de la localización geográfica. Considerando que varios de los protocolos de rehabilitación demandan las propiedades antropométricas de la persona a ser tratado, se desarrolló un sistema de digitalización usando técnicas de fotogrametría que sea de fácil transporte y los dispositivos de captura fueran de bajo costo y fácil adquisición en el mercado nacional. Para la validación del diseño fueron planteados varios escenarios de aplicación. El caso de uso tratado en este artículo describe un proceso de integración tecnológica para la digitalización 3D de un cuerpo humano para la caracterización antropométrica.



DIGITALIZACIÓN 3D

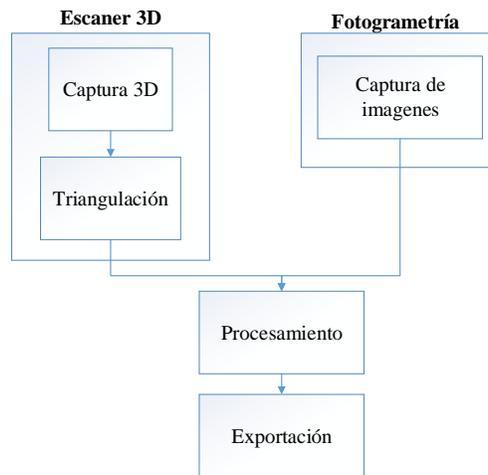


Fig. 1 Proceso de digitalización. Fuente: modificado de [2].

Actualmente, en el mercado existen una variedad de proveedores basados en fotogrametría que permiten varias actividades, tales como: captura, procesamiento y visualización de la silueta digitalizada del cuerpo humano. A continuación se presenta una muestra de estos ofertantes, Northern Digital Inc y su sistema Optotrak Certus, BTS Bioengineering y sus módulos por especialidad G-Walk, G-Sport y Smart DX [4]–[7]. Un aspecto a resalta de la técnica de fotogrametría es su facilidad de integración con proveedores de software especializados. Por ejemplo, Ariel Dynamic y su producto, Ariel Performance Analysis System (APAS), que permite realizar un análisis biomecánico a partir de videos registrados en formatos digitales tradicionales.

Del análisis de las ofertas comerciales consultadas se puede concluir que productos de los proveedores mencionados se centran principalmente en la precisión de los resultados de la digitalización y el volumen de la medición definida por el alcance de los sensores. Aunque los resultados que ofrecen estas ofertas tecnológicas presentan características que favorecen la digitalización 3D del cuerpo humano, estas ofertas presentan una arquitectura cerrada que impiden que se adicione nuevas funcionalidades, restringiendo la escalabilidad de la aplicación para realizar adaptaciones de acuerdo a los objetivos de las investigaciones, donde se requiera realizar modificaciones sobre la estructura, sensores y actuadores del sistema de captura, entre otros.

En este sentido, este artículo presenta el desarrollo de un dispositivo de digitalización 3D basado en la técnica de fotogrametría. El sistema consideró procesos de fabricación disponibles localmente y el uso de aplicaciones computacionales de uso libre que favorecieran aspectos económicos y de escalabilidad. El sistema desarrollado permite la digitalización de elementos de distintos tamaños, a modo de ejemplo, se presenta la digitalización de un cuerpo humano. Su digitalización permitió realizar estudios posteriores de antropometría.

El documento está estructurado en cuatro secciones. En la siguiente sección se presenta el procedimiento metodológico llevado a cabo para el desarrollo del dispositivo de digitalización. Seguidamente, son descritos los resultados obtenidos que permitieron la especificación de la solución. Finalmente, las conclusiones son discutidas.



Procedimiento metodológico

En la Fig. 2 se presenta el procedimiento metodológico para el desarrollo del sistema de digitalización 3D usando técnicas de fotogrametría. La primera fase corresponde al diseño del sistema, esto incluye: la definición de: requerimientos, interacción con los usuarios, y la estructura operacional del sistema. El sistema de digitalización consta de dos partes: un sistema de captura de imágenes y una integración computacional para el procesamiento de éstas. El sistema de captura se diseñó considerando los lineamientos de un diseño modular que facilitarían un escalamiento o actualización de la solución. Para la integración de aplicaciones computacionales se consideraron aspectos funcionales, tales como: la ejecución de las actividades de alineación de imágenes, generación de nube de puntos, generación y edición de malla y posterior generación de un archivo de extensión igs. Adicionalmente, con el propósito de permitir la escalabilidad de la aplicación para realizar adaptaciones de acuerdo a los objetivos de futuras investigaciones se definieron requisitos de uso elementos de bajo costo tanto en los aspectos de hardware y software, priorizando la integración de aplicaciones computacionales de distribución libre en los sistemas de: captura y procesamiento de imagen, así como el módulo de análisis posteriores.

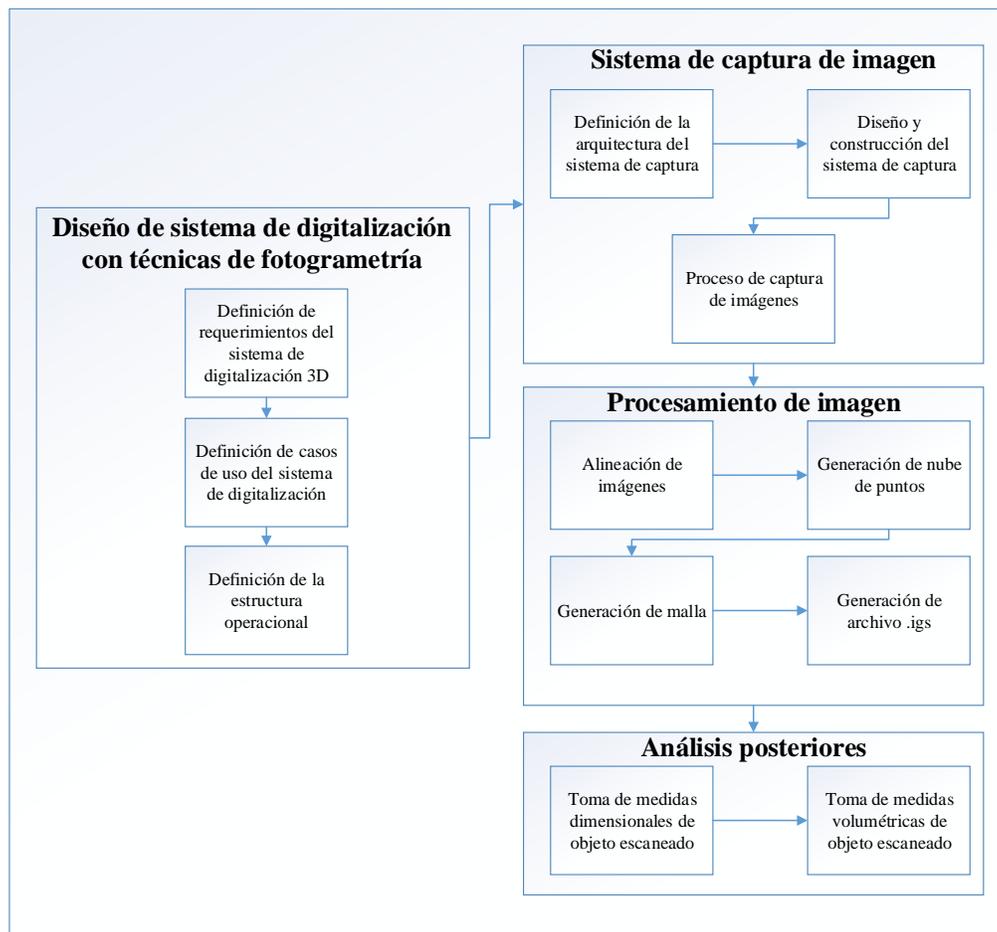


Fig. 2 Procedimiento metodológico propuesto para el desarrollo del sistema de digitalización 3D usando técnicas de fotogrametría.



Desarrollo del trabajo

Diseño de sistema de digitalización con técnicas de fotogrametría

Definición de requerimientos del sistema de digitalización 3D

La definición de requisitos se orientó en la metodología Volere [8], la cual se inicia validando la viabilidad del proyecto con la identificación aspectos relacionados con: la motivación, las restricciones y los requerimientos funcionales. Una vez validado el alcance del proyecto se identificaron los casos de uso y los posibles escenarios, encontrando que el escenario con mayor complejidad y que contiene la mayoría de casos de uso es cuando el sistema es utilizado por primera vez, es decir cuando los usuarios interactúan con el sistema para generar su primer ingreso a la plataforma diseñada, denominada MESH.

Adicionalmente, el proceso de identificación de requisitos consideró entrevistas a futuros usuarios, como por ejemplo un personal del área de la salud (médico y fisioterapeuta). Los diagramas que resumen los requerimientos fueron creados siguiendo el lenguaje Sysml (Systems Modeling Language), estándar de OMG (Object Management Group) [9]–[11].

El diagrama de requisitos del sistema detalla las demandas de cada uno de los tres subsistemas de la plataforma de MESH: usuario, software y mecánico-eléctrico, ver Fig. 3. Cada grupo de requisitos fue posteriormente detallado hasta alcanzar un nivel de detalle claro para el equipo de diseño que por cuestiones de espacio no son presentados en este trabajo. En términos generales, los requisitos de usuario resaltan características de usabilidad y el control que debe tener el usuario sobre sistema propuesto. Mientras, los requisitos de software y mecánico-eléctrico demandan aspectos como bajo costo, portabilidad, peso mínimo y máxima durabilidad.



Fig. 3 Diagrama de requerimientos – Requisitos del sistema en general



Definición de casos de usos del sistema de digitalización

Una vez establecidos los requisitos y definido el alcance del proyecto se procedió a desarrollar el diagrama de casos de uso, tal como se muestra en la Fig. 4. Seguidamente, se listaron las actividades que el sistema necesitaba desarrollar para cumplir con el alcance propuesto. Esto permitió determinar las condiciones, eventos y actores considerados en cada una de las actividades. Específicamente, para el sistema fueron definidos tres actores: Paciente, Funcionario y Administrador. El actor Paciente es la persona sobre la cual se realizará la medición antropométrica, este tendrá un comportamiento pasivo pues su actuar no influenciará directamente el desempeño del sistema. El actor Funcionario corresponde al profesional de la salud que cuenta con la experiencia, para realizar la medición de cada paciente, además de ser el único con autorización para modificar y visualizar la historia clínica del paciente. Por último, el actor Administrador es el personal con un nivel de autorización para realizar las verificaciones de funcionamiento necesarias en las intervenciones de mantenimiento preventivo o correctivo.

Los casos de uso que se relacionan directamente con los actores son: Ingresar plataforma, registrar paciente, ejecutar escaneo, y procesar señal, los cuales a su vez desencadenan los siguientes casos de uso: Autorizar ingreso, rechazar ingreso, registrar información en SQL y FILE store, posicionar transductor, activar transductor, acondicionar y registrar señal de transductor.

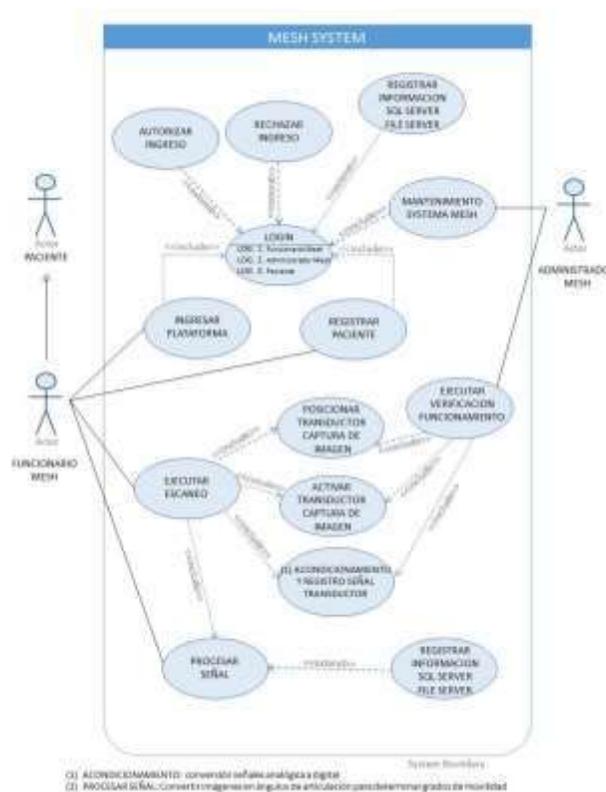


Fig. 4 Diagrama de casos de uso.



Definición de la estructura operacional

En la Fig. 5 se presenta un esquema donde se expresa la secuencia de actividades relacionada con el caso de uso ejecutar escaneo del sistema. Cada actividad representa un flujo de control específico, a modo de ejemplo en la Fig. 5 (a) se presenta el esquema general, mientras que en la Fig. 5 (b) se presenta un detalle de la actividad “Preparar sistema de escaneo”.

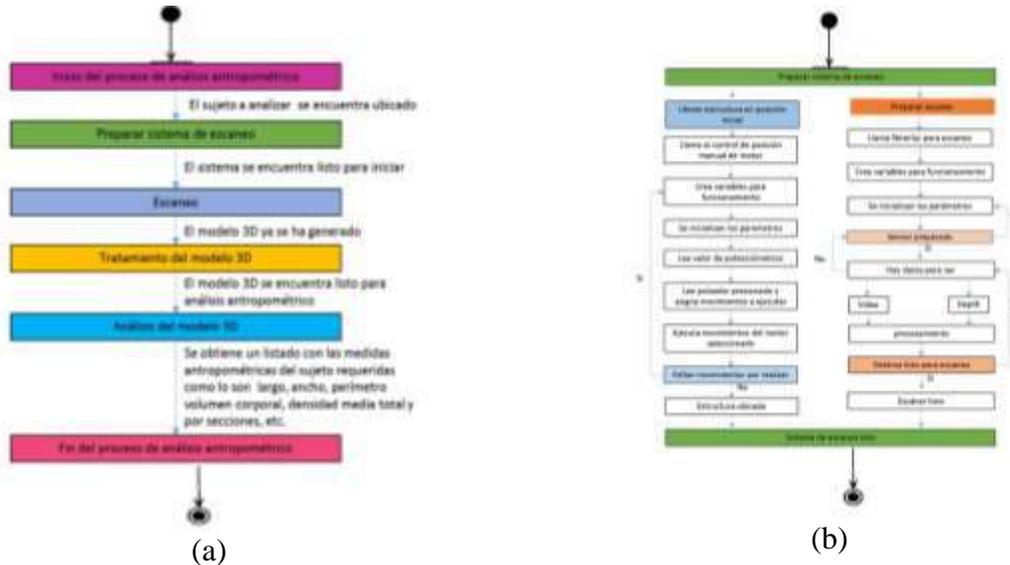


Fig. 5 Esquema de la secuencia de control. (a) Global, (b) esquema para “Preparar sistema de escaneo”.

Sistema de captura de imagen

Definición de la arquitectura del sistema de captura

En la Fig. 6, se presenta el diagrama de arquitectura de los subsistemas con sus diferentes componentes y como se relacionan. Este diagrama no solo describe la estructura del sistema, al mostrar los vínculos entre componentes, sino que también ofrece una descripción de las operaciones del sistema. A modo de ejemplo, las relaciones entre el bloque de User interface y el bloque de procesamiento de imagen/información describen las operaciones que el usuario general o un usuario especial.

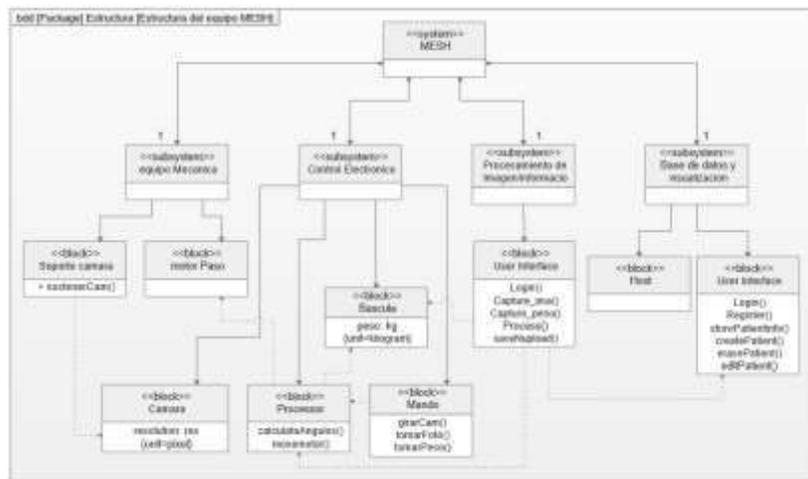


Fig. 6 Diagrama de bloques general arquitectura de los componentes.



Diseño y construcción del sistema de captura

Considerando los requisitos, arquitectura y estructura de control del sistema se implementó una estructura mecatrónica la cual posee una base móvil para posicionar los sensores de digitalización (5 cámaras web), un riel para desplazarse alrededor del usuario, como se aprecia en la Fig. 7.



Fig. 7 Prototipo de sistema de captura. (a) estructura física, (b) software.

En la Figura 6 se presenta la configuración electrónica para el control de movimiento. Este consta de dos motores DC 12 Volt controlados por la plataforma de concepto abierto llamada Arduino mediante la implementación de protocolos PWM y drivers de potencia, puente H. En la parte superior del esquema se observa las salidas digitales 1 y 2 las cuales controlan el sentido de giro del sistema. Considerando que la velocidad en los motores debe ser la misma, se permite un ajuste por medio de resistencias variables, potenciómetros, uno conectado a la entrada analógica A1 y otro conectado a la entrada analógica A2 la cual permite una configuración de la velocidad del giro de la estructura que soporta las cinco cámaras web.

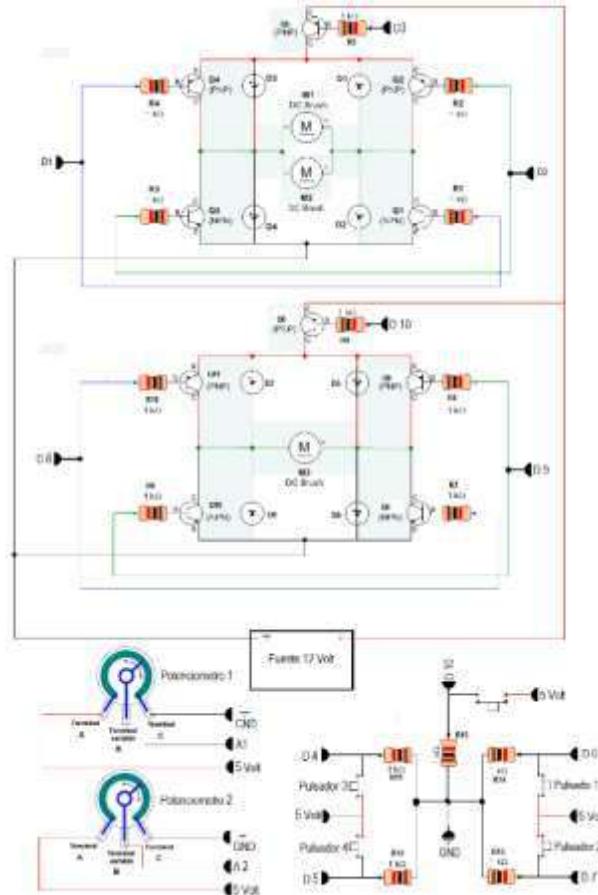


Fig. 8 Electrónica para el control de movimiento.

Proceso de captura de imágenes

Para iniciar el proceso de digitalización se debe ubicar al usuario en el centro del sistema de captura. Luego, mediante una aplicación computacional se configura la velocidad de avance y movilizan los dispositivos de captura de imagen hasta alcanzar una posición inicial de digitalización. Para la digitalización de la silueta 3D, la estructura de soporte de las cámaras gira 360 grados alrededor de la persona y mediante una aplicación desarrollada se captura cada segundo la imagen de las cámaras web. Los fotogramas son registrados automáticamente para un posterior procesamiento que permite generar una nube de puntos con muestras geométricas sobre la superficie de la silueta. Mediante estos puntos se puede extrapolar la forma del sujeto mediante un proceso de reconstrucción digital [12].

Procesamiento de imagen

Para el procesamiento de imágenes se usó una aplicación de uso libre de fotogrametría denominada visualSFM [13]. Este software permite la alineación de imágenes y generación de nube de puntos. Posteriormente, con el software Meshlab y Netfabb [14], [15] se genera el enmallado de la nube de



puntos. Una vez finalizado el proceso de enmallado puede exportarse el objeto digitalizado en formato igs.

Análisis posteriores

Aunque la nube de puntos es una réplica digital de una persona escaneada conservando las dimensiones, frecuentemente se generan discontinuidades debido a oclusiones en la luz de los fotogramas. Para obtener una continuidad en la nube de puntos utilizada la aplicación computacional Netfabb Basic. En la Fig. 9 se observa el tratamiento realizado a una nube de puntos con áreas de discontinuidades menores a 5 mm^2 hasta alcanzar un modelo continuo.



Fig. 9 Nube de puntos 3D de la silueta humana, a) con discontinuidades, b) continua.

Para el proceso de segmentación de las partes del cuerpo y mejora de la malla se realizó un tratamiento de la nube de puntos usando la aplicación Meshlab. De esta forma, se selecciona el segmento de nube de puntos deseado para la caracterización antropométrica de una parte específica del cuerpo humano para iniciar el proceso de enmallado, ver Fig. 10.

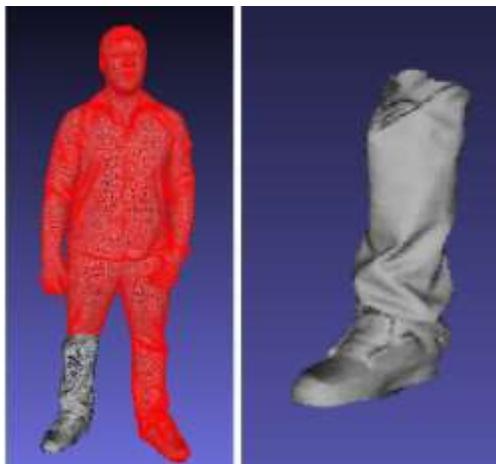


Fig. 10 Segmentación de la nube de puntos.



A continuación, se dio nuevamente continuidad al modelo usando la aplicación Netfabb, ver Fig. 11.

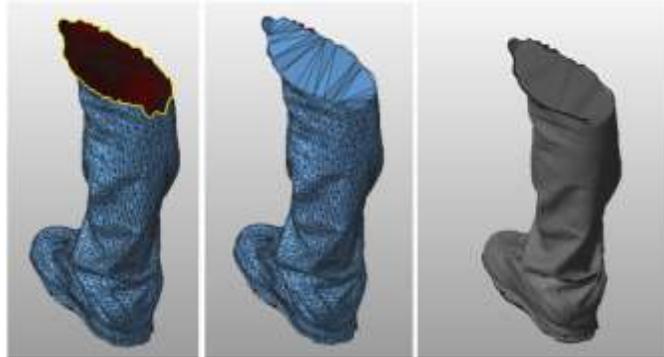


Fig. 11 Reparación de malla en pieza segmentada.

Finalmente, se generó un modelo sólido limitado por la silueta digitalizada usando la aplicación Netfabb y el cual permite una lectura de parámetros dimensionales asociadas al análisis antropométrico como se observa en la Fig. 12.

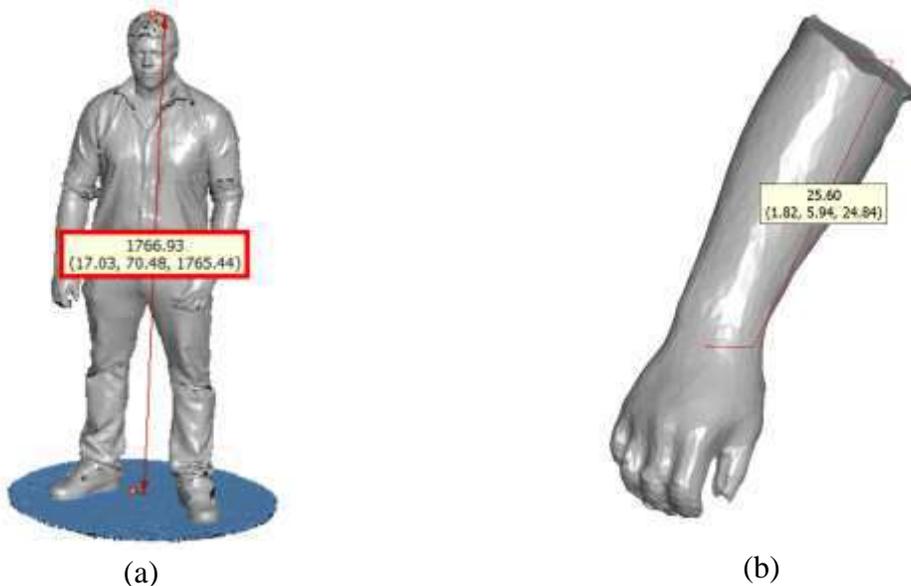


Fig. 12 Mediciones antropométricas en sólido 3D. (a) cuerpo entero, (b) brazo derecho.

El modelo obtenido permite conocer propiedades volumétricas. Por ejemplo, para el caso de la cabeza mostrado en la Fig. 13 presenta un volumen de $5.812 \times 10^6 \text{ mm}^3$.

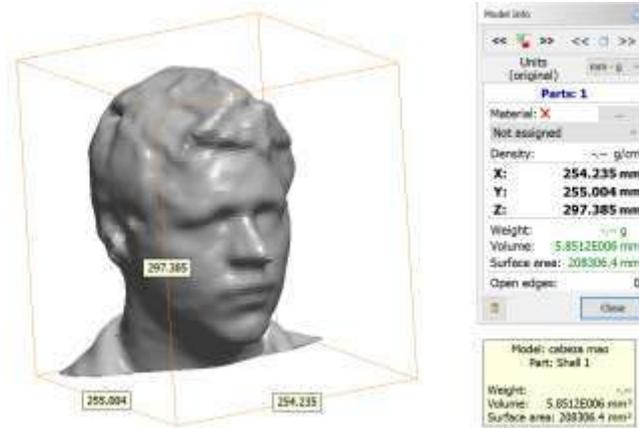


Fig. 13 Mediciones de propiedades volumétricas.

A modo de ejemplo se realizó la caracterización del antebrazo mediante el modelo digitalizado, donde, se estableció una longitud de 256mm. Simultáneamente se realizó una medición directa del brazo de la persona digitalizada, registrando una longitud de 260mm. Se observó una variación de los resultados de 1.5%, esta variación puede reducirse colocando puntos de referencia en la silueta de la persona a lo largo de los segmentos de interés los cuales permitirán realizar un ajuste en el factor de escala en el proceso de generación de la nube de puntos.

Conclusiones

Este trabajo presentó el desarrollo de un sistema que considera la digitalización de objetos usando técnicas de fotogrametría, integrando herramientas de fácil acceso y software libre. Se realizó una evaluación del sistema diseñado mediante la digitalización de una silueta humana. Las características del desarrollo de este prototipo facilitan expandir su uso en investigaciones de distintas áreas del conocimiento, donde sea necesario realizar digitalización de objetos.

Las pruebas realizadas para la digitalización de la silueta humana permitieron identificar que se requiere de aproximadamente 68 segundos para realizar las capturas.

Referencias

- [1] P. Ortiz Coder and B. del Pino Espinosa, “Digitalización 3D automática con láser escáner , fotogrametría y videogrametría . El caso práctico del Templo de Diana (Mérida),” *VAR. Virtual Archaeol. Rev.*, vol. 4, pp. 90–94, 2013.
- [2] D. Koutny, D. Palousek, T. Koutecky, a Zatocilova, J. Rosicky, and M. Janda, “3D Digitalization of the Human Body for Use in Orthotics and Prosthetics,” *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, vol. 72, no. 12, pp. 1487–1494, 2012.
- [3] V. Morales, “Digitalización de una imagen de la virgen del Carmen y los usos del 3D en la conservación y restauración,” Universidad de la Laguna, 2016.
- [4] A. M. Espinosa, “Estudio de la validez de criterio entre diferentes sistemas de análisis cinemático a través de la fotogrametría,” 2015.
- [5] C. F. Bendler and P. D. P. Design, “Método para Obtenção de Medidas Antropométricas



Utilizando um Digitalizador 3D de Baixo Custo cost 3D scanner,” vol. 11, 2016.

- [6] G. Allegretti João *et al.*, “POWERLIFTING: Understanding the modality,” *Rev. Bras. Ciência e Mov.*, vol. 23, no. 4, pp. 179–191, 2015.
- [7] S. Pedrosa *et al.*, “Contributo para o estudo da fidedignidade de duas técnicas de antropometria facial : Paquímetro e fotogrametria Contributo para o estudo da fidedignidade de duas técnicas de antropometria facial : Paquímetro e fotogrametria,” 2016.
- [8] M. Tamayo, *APRENDER A INVESTIGAR Módulo 5*. 1999.
- [9] S. Distilled *et al.*, “Praise for SysML Distilled.”
- [10] M. Hause, “The SysML Modelling Language,” *Fifteenth Eur. Syst. Eng. Conf.*, no. September, p. 12, 2006.
- [11] J. L. Fernández Sánchez, “Los Modelos en la Ingeniería de Sistemas,” *IX Congr. Int. Ing. Proy.*, pp. 1–10, 2005.
- [12] C. Crespo and E. Fernandez, “Diseño e implementacion de unescaner 3D para prototipado y modelado geometrico,” vol. 1, 2014.
- [13] C. Wu, “VisualSFM,” 2017. [Online]. Available: <http://ccwu.me/vsfm/>.
- [14] P. Cignoni *et al.*, “MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool,” *Sixth Eurographics Ital. Chapter Conf.*, pp. 129–136, 2008.
- [15] M. Rainone, C. Fonda, and E. Canessa, “IMAGINARY Math Exhibition using Low-cost 3D Printers,” 2014.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad del Valle por el soporte económico brindado en el contexto del proyecto de convocatoria interna CI 2968.



Hardware-In-the-Loop de un Péndulo Simple Utilizando un Controlador PID Implementado en Dos Arquitecturas

Hardware-In-the-Loop of a Simple Pendulum Using a PID Controller Implemented Using Two Architectures

Rosaura Anaid Suárez-Santillán^{1,γ}, Noemi Hernández Oliva¹, Cuauhtémoc Morales Cruz¹, Maria Bárbara Calva Yáñez¹, Gabriel Sepúlveda Cervantes¹, Edgar Alfredo Portilla Flores¹

1. Instituto Politécnico Nacional, Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Cómputo, México.

γ. Autor correspondiente: anaid.suarez@gmail.com

Resumen

Actualmente existe una demanda de nuevas herramientas para acelerar el desarrollo de sistemas mecatrónicos complejos y una de estas herramientas con gran potencial es la técnica de Hardware-In-the-Loop. Con este enfoque es posible sustituir la planta o el sistema físico sobre el cual se está trabajando de forma total o parcial dependiendo de las necesidades del desarrollador. Por otro lado, la búsqueda de robustez y autonomía que se requiere para controlar el sistema ha crecido ampliamente, permitiendo que existan controladores en sistemas con gran capacidad de cómputo para el desarrollo y evaluación de la ley de control, o bien, sistemas dedicados para su aplicación. Es por ello que en este trabajo se presenta la implementación del sistema de un péndulo haciendo uso de la técnica mencionada y la aplicación de un controlador desarrollado en dos plataformas diferentes para mostrar la viabilidad de su aplicación.

Palabras clave: Hardware-in-the-Loop, modelo dinámico, controlador PID, simulación en tiempo real.

Abstract

Currently, there is a growing interest in the use of new tools to accelerate the development of complex mechatronic systems. The Hardware-In-the-Loop technique stands as a potentially good approach to fulfill this demand. This tool substitutes the physical system in a total or a partial way depending on the designer requirements. On the other hand, the search for robustness and autonomy required to control the system has grown widely. Therefore, the control algorithm can be implemented either in large computers for the development and evaluation of the control law, or in embedded systems for their application. For this reason, this work presents the implementation of a pendulum system using the Hardware-In-the-Loop technique. Moreover, the control algorithm is implemented using two different platforms to show the feasibility of both.

Keywords: Hardware-in-the-Loop, dynamic model, PID controller, Real time simulation.

Introducción

El uso de nuevas tecnologías en el área de ingeniería crece día con día, permitiendo evolucionar la investigación científica y tecnológica. Sin embargo, en muchas de las aplicaciones es necesario hacer una gran inversión de recursos materiales, de los cuales muchos de ellos son poco ocupados y terminan siendo relegados como recursos obsoletos al paso del tiempo.



Actualmente, los dispositivos electrónicos de alto rendimiento y flexibilidad presentan una creciente demanda en las industrias y he ahí la importancia de encontrar procedimientos de prueba para evaluar las estrategias desarrolladas en condiciones de tiempo real y antes de la implementación final [1]. Además, el rendimiento de un controlador requiere que su diseño esté fuertemente vinculado al modelo físico de la planta asociada, esto conlleva a constantes actualizaciones que pueden ser limitadas por la disponibilidad de la planta.

Para estos casos, las tecnologías actuales presentan ventajas para incrementar la velocidad de desarrollo en ciertos sectores, siendo Hardware-In-the-Loop (HIL) una metodología de simulación potencialmente poderosa ya que permite investigar el comportamiento de los componentes reales en un ambiente virtual y en tiempo real [2]. Su principio básico es que la parte real de un sistema es remplazado con un modelo de simulación en tiempo real, lo cual permite probar los componentes físicos del sistema que se comunican con el modelo de software y de esta manera simular el comportamiento del resto del sistema, como se muestra en la Fig. 1.

La aplicación de la metodología HIL data de la década de los 80's teniendo cada vez más campos de aplicación, los cuales son diferentes y muy variados [3]. Es posible aplicar esta técnica a cualquier sistema que pueda ser representado por un modelo matemático o bien alguna aproximación como es el caso de los modelos subrogados [4] [5]. Entre los sistemas más comunes se encuentran los Sistemas Hidráulicos [6], la Industria Automotriz [7] [8] [9], la Electrónica de potencia [10] [11] [12] [13], los Sistemas aeronáuticos [14], los Vehículos espaciales [15] y la Robótica [16]. Algunos ejemplos del uso de HIL con diversas arquitecturas son presentados [17] [18] [19] [20]

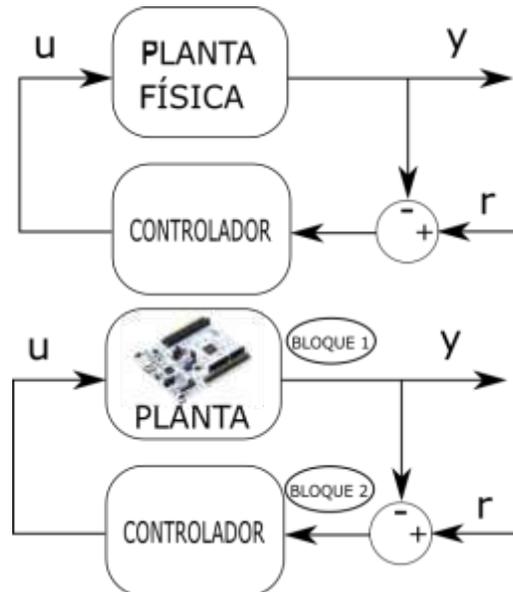


Fig. 1: Diagrama esquemático HIL

En este artículo se lleva a cabo la implementación del modelo completo de un péndulo simple utilizando la metodología Hardware-In-the-Loop en una tarjeta de desarrollo y el desempeño que presenta un controlador implementado en dos arquitecturas: uno implementado en un software comercial y el otro en un sistema embebido de libre acceso. Este trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se describe el modelo dinámico del péndulo así como el comportamiento deseado que se debe alcanzar al aplicar el controlador; en la sección 3 se muestra la implementación del modelo en HIL así como los dos programas de control que realizarán el



seguimiento de la trayectoria definida; en la sección 4 se presentan y discuten los resultados obtenidos de ambos sistemas y por último se exponen las conclusiones correspondientes a los resultados obtenidos.

Caso de estudio: Péndulo simple

En esta sección se presenta el modelo del péndulo con el cual se va a trabajar, así como la planta física y el proceso de estimación que se llevó a cabo.

Modelo dinámico

El sistema mecánico denominado péndulo simple, mostrado en la Fig. 2, es la planta propuesta para el desarrollo de esta implementación. Tomando en cuenta, a m como el elemento mecánico situado en el extremo de una barra de masa despreciable con una longitud l , por otro lado, a b como el coeficiente de fricción viscosa que describe la fricción en el rodamiento y a τ como el par aplicado al sistema.

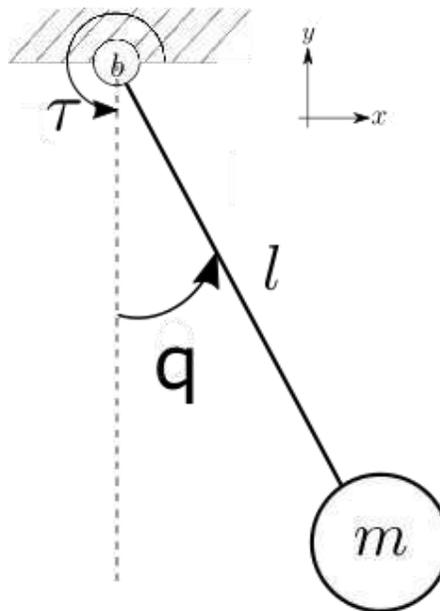


Fig. 2: Péndulo simple.

El modelo dinámico del sistema es obtenido con la metodología Euler-Lagrange tomando en cuenta la coordenada generalizada (q) y el planteamiento se muestra en (1).

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} \right) + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q} = \tau \quad (1)$$

Donde:

L = Lagrangiano del sistema

τ = par



D = función de disipación de Rayleigh para sistemas amortiguados

El Lagrangiano del sistema y la función de disipación de Rayleigh, están dados por (2) y (3).

$$\mathcal{L} = K - U \quad (2)$$

$$D = \frac{1}{2}b\dot{q}^2 \quad (3)$$

Donde:

$$U = -mgl\cos(q) \quad \text{energía potencial}$$

$$K = \frac{1}{2}m\dot{q}^2l^2 \quad \text{energía cinética}$$

El ángulo q es la única variable de salida, la cual indica la posición en la que se encuentra la masa del péndulo, debido a que el movimiento de la masa está limitado a permanecer en un círculo de radio igual a la longitud de la barra. Sustituyendo U y K en el Lagrangiano, se obtiene la ecuación de movimiento que describe al sistema del péndulo simple, la cual se presenta en (4):

$$ml^2\ddot{q} + b\dot{q} + mg\sin(q) = \tau \quad (4)$$

A partir de la ecuación de movimiento descrita en (4), el vector de variables de estado es el siguiente $\dot{x} = [x_1, x_2]^T = [q, \dot{q}]^T$ y la entrada del sistema es τ , la dinámica en el espacio de estados se presenta en (5).

$$\begin{aligned} \dot{x} &= [x_1, x_2]^T = [q, \dot{q}]^T \\ \dot{x} &= \left[\frac{\tau}{ml^2} - \frac{b}{ml^2}x_2 - \frac{g}{l}\sin(x_1) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

Construcción de la planta

Una vez seleccionada la barra de aluminio que fungirá como el péndulo de radio constante, se seleccionó un motor que permitiera llevar a cabo la tarea de control. Obteniendo el sistema de péndulo simple mostrado en la Fig. (3).



Fig. 3: Péndulo físico

Estimación de parámetros

El peso del péndulo es el único parámetro medido de forma directa haciendo uso de una báscula. Por otro lado, se consideró que la distribución de la masa de la planta construida no tiene una distribución uniforme, por lo tanto, se implementó un estimador de parámetros para calcular la posición del centro de masa (l) y la constante de fricción viscosa (b) en el sistema. Para la adquisición de datos de la posición angular del péndulo se hizo uso del encoder H6MS-2048-I de USDIGITAL y se conectó con la tarjeta LS7366R que puede leer simultáneamente dos encoders de cuadratura y que incluye un instrumento digital reservado para el almacenamiento temporal de información digital (buffer).

Esta información se envió a Matlab para la recopilación de datos del comportamiento de la planta. Se realizaron 30 experimentos para la adquisición de datos, tomando en cuenta como condición inicial valores de ángulos grandes y ángulos pequeños. Después de hacer el procesamiento de los datos adquiridos, los resultados obtenidos de la planta son mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros del Sistema

Parámetros	Valor
l	0.2326 m
b	0.0015 Nm/s
m	0.04617 kg
g	9.81 m/s

Control PID

Un controlador PID es un controlador ampliamente utilizado en la industria presentando buenos resultados. Aún con las técnicas de sintonización, solo se obtiene una primera aproximación y después se ajusta a las características planteadas. Siendo este controlador el encargado de aplicar



una acción correctora para que el error entre la señal de referencia y la señal de salida de la planta, se reduzca, será utilizado para llevar al sistema de péndulo simple a la posición deseada y cumplir con la tarea de seguimiento. El PID convencional tiene solo tres parámetros para ajuste [21] como se describe en (6):

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

donde:

$$e(t) = q_d(t) - q(t)$$

$$\dot{e}(t) = \dot{q}_d(t) - \dot{q}(t)$$

Se debe tomar en cuenta que la selección de constantes es muy importante, ya que, si las constantes no son seleccionados apropiadamente, el controlador no proporcionaría la salida deseada. Debido a esto, las constantes del controlador PID se obtuvieron utilizando nuevas técnicas de sintonización óptima para cumplir los requerimientos en el desempeño del controlador siguiendo una metodología similar a la reportada en [22]. Este controlador fue sintonizado de manera óptima para cumplir los siguientes tres criterios: un tiempo de levantamiento de 0.5 s, el valor máximo para la entrada del sistema es de 2 Nm y un sobretiro máximo del 2% de la velocidad angular deseada. Finalmente, todas las constantes del sistema se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Constantes del Controlador

Parámetros	Valor
k_p	2.5319
k_i	1.1684
k_d	0.1148

Implementación HIL

Para resolver el modelo dinámico que representa el sistema de un péndulo simple, se realizó la implementación de Hardware-In-the-Loop. Debido a las ventajas obtenidas en casos anteriores, se decidió por utilizar la tarjeta de desarrollo denominada STM32F4 Discovery Kit la cual utiliza el microcontrolador STM32F0407VGT6 [23]. Es esta primera parte la correspondiente al intercambio entre la planta y el sistema físico. A partir de este punto, se debe tomar en cuenta que se realizarán dos sistemas diferentes. Si bien, la planta y el controlador son los mismos, la manera de implementación del controlador varía en cuanto al tiempo y forma de programación se refiere, los cuales son:

1. HIL(Planta) con Simulink(Control)
2. HIL(Planta) con Arduino(Control)



HIL del péndulo simple

En ambos casos, el primer módulo de HIL consiste en la implementación del modelo dinámico del sistema en Simulink con los parámetros obtenidos anteriormente [24]. La comunicación del HIL con el controlador se realiza utilizando comunicación serial en ambos casos. Es por ello que en la Fig. 4 se muestra la composición del sistema que se carga a la tarjeta en el cual interactúan el módulo de la configuración de la tarjeta y los módulos de la comunicación serial de la misma. Estos módulos de comunicación representan la entrada y salida de datos de la tarjeta, los cuales serán los encargados del traspaso de información entre el control y el modelo. Al configurar la tarjeta, se debe especificar el tiempo de muestreo con el que trabajará el sistema completo, así como colocar correctamente el tipo de tarjeta que se utilizará.

En este sistema se utilizó un tiempo de muestreo de 1ms. Este modelo es una representación de la planta del sistema, es decir, la única señal de salida es la posición angular actual del sistema debido a que físicamente es la única variable que se mide directamente. Por lo tanto, el HIL recibirá la señal en el controlador, procesará esta señal y enviará la señal de salida, la cual es la posición angular en la que se encuentra el sistema debido a la señal de control. Es por ello que la velocidad se estima con base en la información obtenida de la posición, permitiendo hacer una sustitución completa entre la planta y el sistema implementado en HIL haciendo uso del mismo controlador.

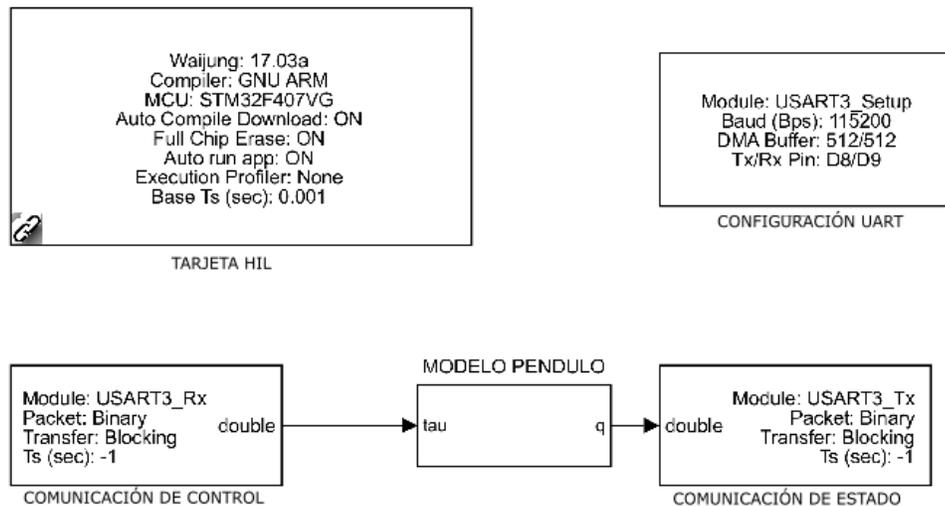


Fig. 4: Configuración del Modelo Dinámico del Péndulo

Se debe tener en claro que el bloque MODELO PENDULO mostrado en la Fig. 4 es un subsistema, por consiguiente, en la Fig. 5 se muestra su contenido y configuración. Este subsistema muestra de manera precisa el comportamiento de (5), el cual consta de una entrada externa (señal de control) y dos entradas internas que son los estados del sistema, correspondientes a los valores de la posición y la velocidad angular del péndulo y se obtienen con dos integradores que resuelven el sistema de segundo orden del sistema de estudio. Estos integradores solucionan el modelo dinámico del sistema en (4) con una posición inicial y una velocidad inicial, en este modelo se decidió comenzar en una posición inicial de cero y velocidad inicial cero. La ecuación de movimiento del sistema es



implementada con el bloque MODELO PENDULO en la Fig. 5 el cual es un bloque de tipo S funtion de Simulink y permite implementar el modelo matemático completo No-Lineal del sistema.

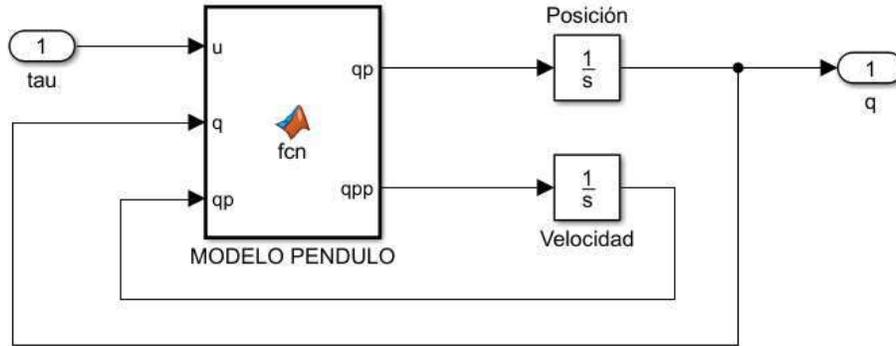


Fig. 5: Modelo Dinámico del Péndulo en Simulink

Controlador en Simulink

En el esquema de control corresponde al bloque marcado con el número 2 en la Fig. 1 se muestra el módulo donde se implementará el controlador. Así mismo, este módulo es completamente independiente del sistema implementado en HIL, por lo consiguiente este módulo puede ser aplicado a la planta real o a la emulada con HIL, tomando algunas consideraciones prácticas para cada caso. Es entonces que el controlador se implementó para realizar la tarea de seguimiento de trayectoria descrita en (7).

$$q_d = \frac{\pi}{4} + 0.1 \sin(t) \quad (7)$$

El primer controlador PID se implementó en Simulink-Matlab, como se muestra en la Fig. 6. En esta figura se muestra la configuración del controlador: la comunicación serial es empleada para transmitir el valor de la posición angular en HIL hacia Simulink y el valor del par calculado de Simulink hacia el HIL. Una vez especificadas las constantes o las ganancias que fueron generadas por el algoritmo de optimización, sólo se asignan como valores de entrada internos.

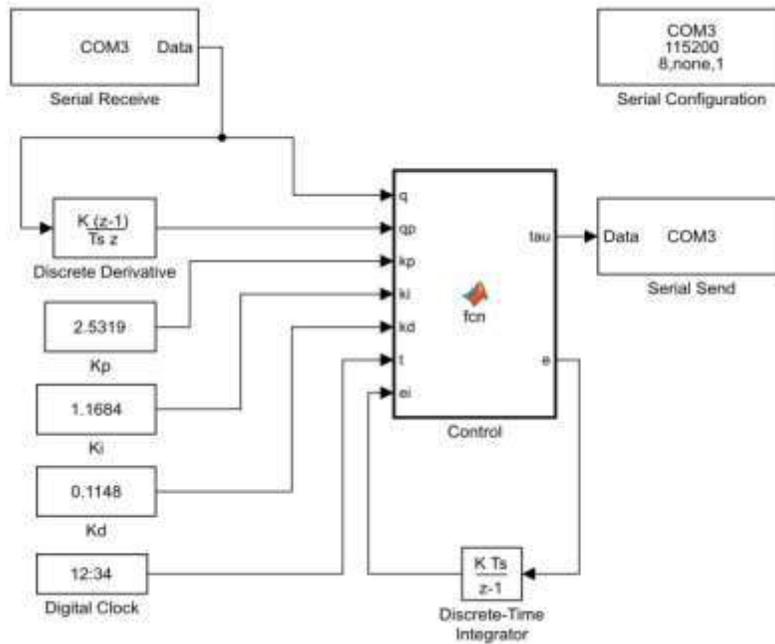


Fig. 6: Configuración del Control PID

Para calcular la señal de control (τ), se deben de colocar dos módulos para obtener el valor de la derivada del error (\dot{e}) y la integral del error (e_i). Es por ello que se utilizaron los módulos de derivada discreta e integral discreta respectivamente y así tener todos los valores necesarios para cumplir con (6). En la Fig. 11 se muestra el diagrama esquemático de las conexiones existentes entre la planta(HIL) y el controlador implementado en Simulink.

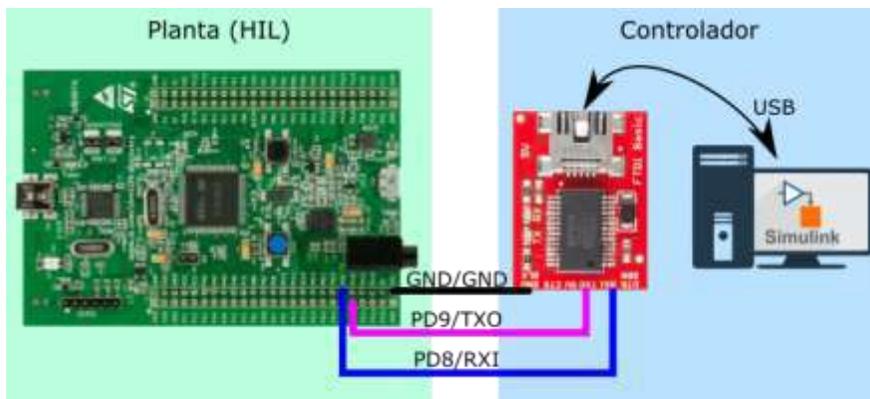


Fig. 7: Diagrama esquemático de conexiones

Adicionalmente, en la Fig. 8 se presenta el sistema HIL completo implementado en conjunto con el controlador en Simulink. Aquí se aprecia la tarjeta de desarrollo en la cual está contenido el modelo dinámico del péndulo, la comunicación serial entre la tarjeta de desarrollo y Simulink, así como el control implementado en Simulink.

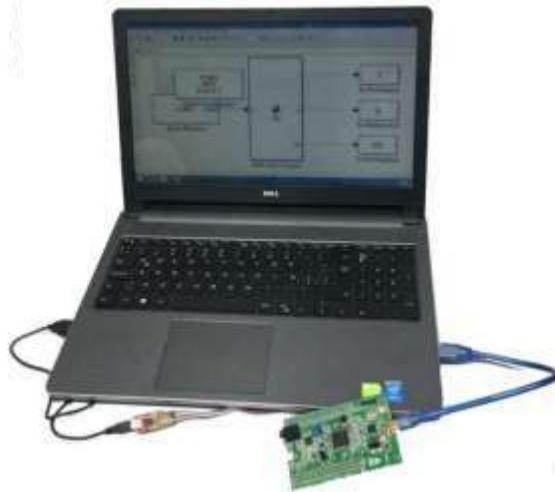


Fig. 8: Sistema HIL completo STM-Simulink

Controlador en Arduino

Por otro lado, el segundo controlador implementado es un controlador en un entorno diferente usando la tarjeta Arduino UNO. En la Fig. 9 se presenta el diagrama de flujo que describe el funcionamiento del programa principal en Arduino UNO. La comunicación serial está configurada con la misma tasa de comunicación de 115200. Es por ello, que se obtuvieron dos datos de manera serial para su procesamiento en el programa, para obtener la señal de control.

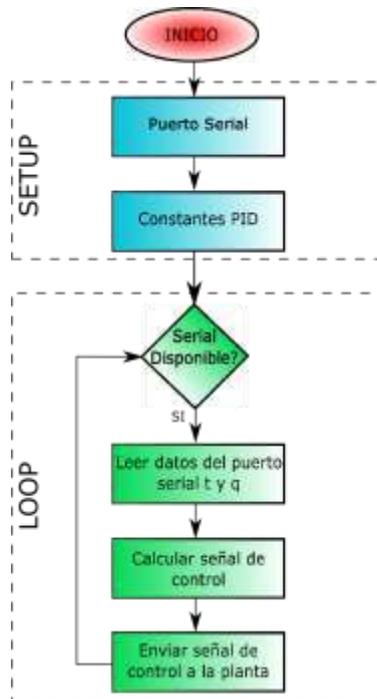


Fig. 9: Diagrama de flujo de Control



En la Fig. 11 se presenta de manera esquemática como está compuesto el sistema completo HIL-Arduino. Se muestra la comunicación serial del HIL hacia el control en el Arduino y otra comunicación serial del HIL hacia un observador.

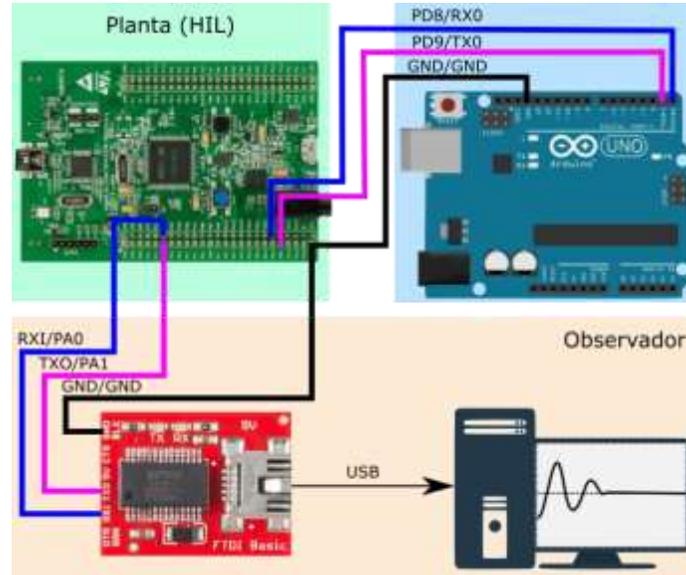


Fig. 10: Diagrama esquemático STM-Arduino

Como su nombre lo indica, el observador permite obtener los valores enviados al Arduino y estar monitoreando las variables de estado. La tasa de comunicación entre el HIL y el Arduino es diferente a la que se tiene entre el HIL y el observador, mientras que el primero tiene una tasa de 115200 baudios por segundo el segundo maneja una tasa de 9600 baudios por segundo. Una vez recibidos los datos por la comunicación con el observador, se obtienen las variables tiempo y posición. Después, por medio de la función en Matlab, se obtienen la posición deseada en cierto tiempo y el error medido. Estos datos se llevan al Workspace para su almacenamiento y graficación (Fig. 11).

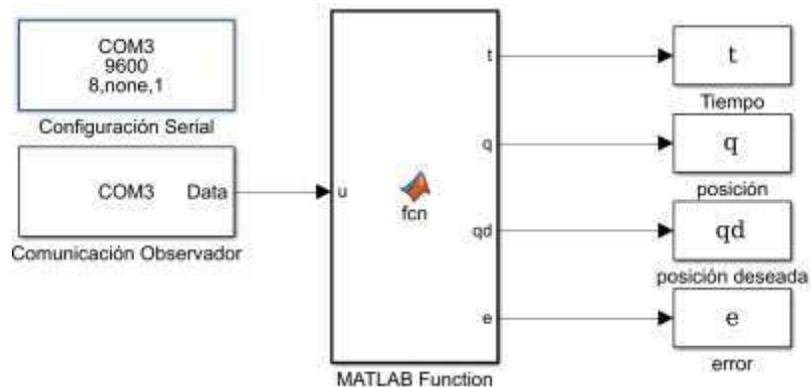


Fig. 11: Esquemático del Observador



Adicionalmente, en la Fig. 12 se presenta el sistema HIL completo implementado en conjunto con el controlador en Arduino. Aquí se aprecia la tarjeta de desarrollo en la cual está contenido el modelo dinámico del péndulo, la comunicación serial entre la tarjeta de desarrollo y la tarjeta Arduino UNO, así como el observador que se encuentra conectado a la tarjeta de desarrollo y al Simulink.

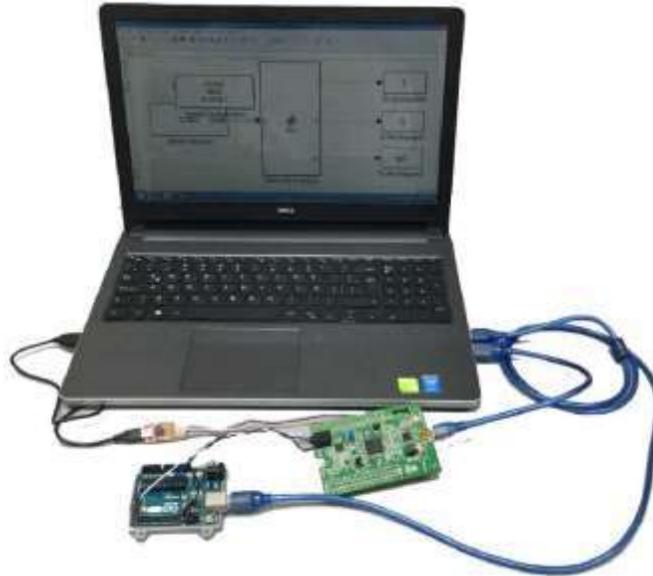


Fig. 12: Sistema HIL completo STM-Arduino

Resultados

Como se puede observar en la Fig. 13 ambos sistemas presentan un seguimiento con error menor al 1% siguiendo la trayectoria deseada especificada en (7), una oscilación de $0.1\sin(t)$ rad en $\frac{\pi}{4}$. Así mismo, se visualiza como ambos sistemas cumplen los tres criterios propuestos en la sintonización de parámetros. Por un lado, en el sistema con Simulink el tiempo de levantamiento es de 0.12ms y el sobretiro del 2 %, y por el otro lado, en el sistema con Arduino presenta un tiempo de levantamiento de 0.04ms y un sobretiro del 2 %. Se demuestra la viabilidad de aplicar el controlador en diferentes arquitecturas y presentan un funcionamiento correcto en conjunto con HIL. El HIL y los controladores se implementaron con el mismo tiempo de muestreo de 1ms mostrando un comportamiento similar.

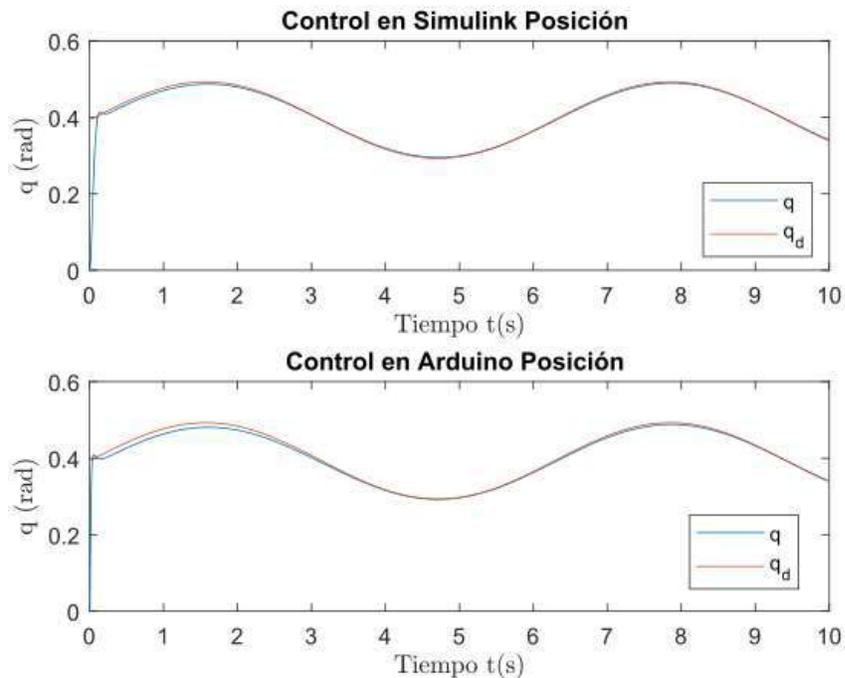


Fig. 13: Estados de los Sistemas

En la Fig. 14 se muestra el error del sistema con el controlador en Simulink con valor máximo de 0.4 rad y valor mínimo de 0.008 rad. Mientras que en controlador en Arduino presenta un valor máximo de 0.4 rad y un valor mínimo de 0.014 rad. En ambos casos el error en estado estable es inferior de 0.004 rad que está debajo de 1% de la amplitud de la trayectoria deseada.

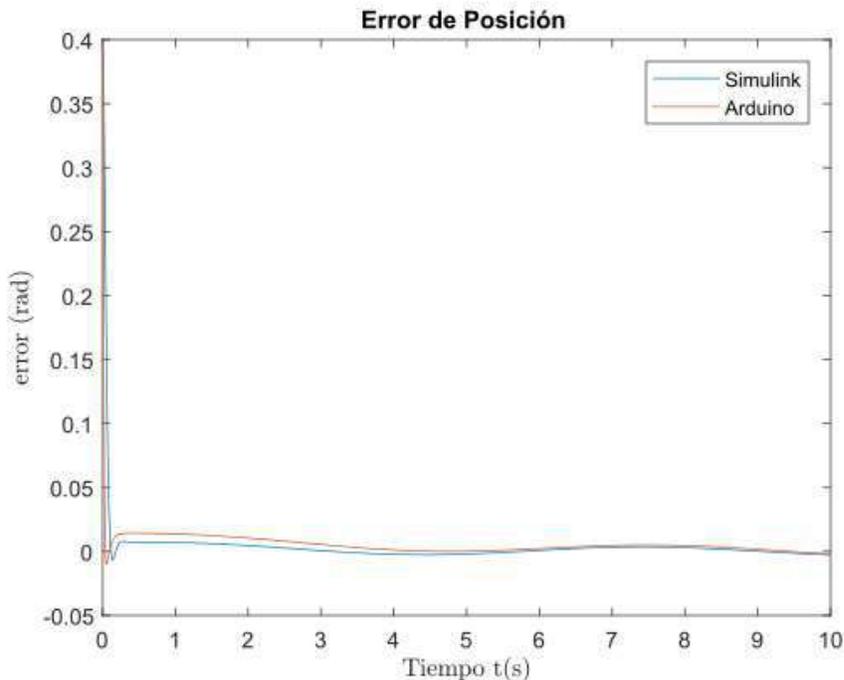


Fig. 14: Error de los Sistemas



Conclusiones

En esta investigación se desarrolló y validó un sistema completo de modelo dinámico en HIL y controlador PID, implementado este último en dos arquitecturas diferentes, HIL-Simulink y HIL-Arduino. En ambas arquitecturas el valor de la señal controlada llegó a lo esperado, cumpliendo las tres restricciones propuestas, permitiendo de esta manera tener diversidad de decisión al momento de seleccionar un controlador. La herramienta HIL funciona en ambos controladores. Por lo tanto, la herramienta HIL se adapta muy bien a ambos enfoques, tanto al utilizar una PC con Matlab-Simulink como al utilizar herramientas de desarrollo de menor capacidad que son utilizadas y actualizadas por la comunidad de hardware-software libre. Eventualmente se puede sustituir la planta desarrollada en HIL, la cual en ambos sistemas presentan un desempeño aceptable.

Referencias

- [1]A. Castaings, A. Bouscayrol, W. Lhomme, and R. Trigui. Power hardware-in-the-loop simulation for testing multi-source vehicles. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1):10971 – 10976, 2017. 20th IFAC World Congress.
- [2]Andreas Vath and Zijad Lemės and Hubert Mäncher and Matthias Söhn and Norbert Nicoloso and Thomas Hartkopf. Dynamic modelling and hardware-in-the-loop testing of pemfc. *Journal of Power Sources*, 157(2):816 – 827, 2006. Selected papers presented at the Ninth Grove Fuel Cell Symposium.
- [3]Balduino Blanque Molina. Simulación Interactiva de Motores de Reluctancia Autoconmutados. Universitat Politacnica de Catalunya, Departament d’Enginyeria Electrica, 2007.
- [4]S. Koziel and S. Ogurtsov. Improved variable-fidelity optimization algorithm for simulation-driven design of antennas. In 2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), pages 2419–2422, July 2011.
- [5]Slawomir Koziel, John W. Bandler, and Kaj Madsen. Quality assessment of coarse models and surrogates for space mapping optimization. *Optimization and Engineering*, 9(4):375– 391, Dec 2008.
- [6]Vesa Ruuskanen and Joonas Koponen and Teemu Sillanpää and Kimmo Huoman and Antti Kosonen and Markku Niemelä and Jero Ahola. Design and implementation of a power-hardware-in-loop simulator for water electrolysis emulation. *Renewable Energy*, 119:106 – 115, 2018.
- [7]T. Ould-Bachir, H. F. Blanchette, and K. Al-Haddad. A network tearing technique for fpga-based real-time simulation of power converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(6):3409–3418, June 2015.
- [8]O. König, C. Hametner, G. Prochart and S. Jakubek. Battery emulation for power-hil using local model networks and robust impedance control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(2):943–955, Feb 2014.
- [9]J. P. F. Trovão, V. D. N. Santos, C. H. Antunes, P. G. Pereirinha, H. M. Jorge. A real-time energy management architecture for multisource electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(5):3223–3233, May 2015.



- [10] G. F. Lauss, M. O. Faruque, K. Schoder, C. Dufour, A. Viehweider, and J. Langston. Characteristics and design of power hardware-in-the-loop simulations for electrical power systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(1):406–417, Jan 2016.
- [11] P. C. Kotsampopoulos, F. Lehfuss, G. F. Lauss, B. Bletterie, and N. D. Hatziaargyriou. The limitations of digital simulation and the advantages of phil testing in studying distributed generation provision of ancillary services. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(9):5502–5515, Sept 2015.
- [12] M. Rezkallah, A. Hamadi, A. Chandra, and B. Singh. Realtime hil implementation of sliding mode control for standalone system based on pv array without using dumpload. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 6(4):1389–1398, Oct 2015.
- [13] C. S. Edrington, M. Steurer, J. Langston, T. El-Mezyani, and K. Schoder. Role of power hardware in the loop in modeling and simulation for experimentation in power and energy systems. *Proceedings of the IEEE*, 103(12):2401–2409, Dec 2015.
- [14] Youngho Eun, Sang-Young Park, and Geuk-Nam Kim. Development of a hardware-in-the-loop tested to demonstrate multiple spacecraft operations in proximity. *Acta Astronautica*, 147:48 – 58, 2018.
- [15] S. Olma, P. Traphöner, A. Kohlstedt, K.-P. Jäker, and A. Trächtler. Model-based method for the accuracy analysis of hardware-in-the-loop test rigs for mechatronic vehicle axles. *Procedia Technology*, 26:105 – 112, 2016. 3rd International Conference on System-Integrated Intelligence: New Challenges for Product and Production Engineering.
- [16] C. E. Agüero, N. Koenig, I. Chen, H. Boyer, S. Peters, J. Hsu, B. Gerkey, S. Paepcke, J. L. Rivero, J. Manzo, E. Krotkov, and G. Pratt. Inside the virtual robotics challenge: Simulating real-time robotic disaster response. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 12(2):494–506, April 2015.
- [17] Lu, B., Wu, X., Figueroa, H., Monti, A.: A low-cost real-time hardware-in-the-loop testing approach of power electronics controls. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 54(2), 919{931 (2007). <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.892253>
- [18] Martínez-Aragón, M., Ramírez-Leyva, F. H., Arias-Aguilar, J. A.: Implementación en "Hardware in the loop" del sistema carro-péndulo invertido con base en el microcontrolador Hercules RM57L843 de Texas Instruments. *Pistas Educativas (SENIE 2017)* 39(128), 1042{1058 (2017).
- [19] Valencia-C., A. J., Mauledoux, M. F., Avilés, O. F., Niño-S., P. A., Portilla-F., E. A.: Embedded System for Front Differential Drive of Rotational and Traslational Vehicle Position Control. *International Review of Automatic Control (I.R.E.A.CO.)* 10(4), 325{331 (2017).
- [20] Qi, C., Ren, A., Gao, F., Zhao, X., Wang, Q., Sun, Q.: Compensation of Velocity Divergence Caused by Dynamic Response for Hardware-in-the-Loop Docking Simulator. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 22(1), 422{432 (2017). <https://doi.org/10.1109/TMECH.2016.2601219>
- [21] R. M. Asl, E. Pourabdollah, and M. Salmani, editors. Optimal fractional order PID for a robotic manipulator using colliding bodies design. *Soft Comput*, 2017.



- [22] María Bárbara Calva-Yáñez, Paola Andrea Niño Suárez, Miguel Gabriel Villarreal-Cervantes, Gabriel Sepúlveda- Cervantes, and Edgar Alfredo Portilla-Flores. Differential evolution for the control gain's optimal tuning of a four-bar mechanism. *Polibits*, (47):67–73, 2013.
- [23] STMicroelectronics. STM32F4DISCOVERY discovery kit with stm32f407vg mcu, 2018.
- [24] Ltd. Aimagin Co. Waijung Blockset, 2017.

Agradecimientos

Todos los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional por el apoyo otorgado a través de la Secretaría de Investigación y Posgrado por medio de los proyectos SIP20181162 y SIP2018808.

Los primeros tres autores agradecen al CONACyT el apoyo otorgado a través de la beca para estudios de doctorado.



Respuesta Hidráulica y Mecánica en una Bomba Centrífuga de Baja Velocidad Específica Debida a Inestabilidades de Carga Parcial

Hydraulic and Mechanical Response in a Low Specific Speed Centrifugal Pump Due to Part Load Instabilities

Hernan Bolaños^{1,γ}, Daniel Tobón¹, Jesús Pérez¹, Francisco Botero¹

1. Universidad Eafit, Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica, Medellín, Antioquia, Colombia

γ. Autor correspondiente: hbolanos@eafit.edu.co

Resumen

La teoría de sistemas permite inferir que inestabilidades hidrodinámicas en una turbomáquina se pueden detectar en su respuesta hidráulica y mecánica. Esto es particularmente conveniente para el mantenimiento y diagnóstico técnico de este tipo de máquinas. En este trabajo se analizó la respuesta hidráulica y mecánica de una bomba centrífuga de baja velocidad específica, y su relación con fenómenos subsíncronicos como el Rotating Stall y el surge. Los resultados obtenidos sugieren la existencia de los dos fenómenos con frecuencias del 2.4% al 8.7% de la frecuencia de rotación del impulsor, en dos zonas diferentes de la curva característica Q_{nD} - E_{nD} . Para llegar a estos resultados se hizo uso de análisis espectral de señales de presión y de torque, y análisis de fase de las fluctuaciones de presión en la voluta de bomba.

Abstract

The theory of systems allows to infer that hydrodynamic instabilities in a turbomachine can be detected in its hydraulic and mechanical response. This is particularly convenient for the maintenance and technical diagnosis of this type of machines. In this work, the hydraulic and mechanical response of a low specific speed centrifugal pump, and its relationship with subsynchronous phenomena such as Rotating Stall and surge, was carried out. Results obtained suggest the existence of the two phenomena with frequencies of 2.4% to 8.7% of the rotation frequency of the impeller. This, in two different zones of the characteristic curve Q_{nD} - E_{nD} . To obtain these results, spectral analysis of pressure and torque signals and phase analysis of the pressure fluctuations in the pump volute were used.

Palabras clave: rotating stall, surge, análisis espectral, análisis de fase

Introducción

Fenómenos hidrodinámicos en una turbomáquina pueden afectar su desempeño en forma de reducción de eficiencia, presencia de altos pulsos de presión y aumento de niveles de vibración [1], lo cual se pone de manifiesto en la respuesta hidráulica, mecánica y eléctrica [2].

Fenómenos hidrodinámicos como el surge y el Rotating Stall (RS) han sido estudiados ampliamente en turbocompresores porque estos se presentan muy cerca del punto de máxima eficiencia [3], en la línea que separa el desempeño estable del inestable y que se denomina línea de surge en la curva de desempeño. En bombas hidráulicas también se presentan [4] [5] [6], pero no cerca del punto de máxima eficiencia. El hecho de que el surge y RS se puedan presentar en un



mismo punto de operación [7] ha generado investigaciones que reportan el RS como precursor del surge y otras que reportan el surge sin relación con el RS [8].

El surge es un fenómeno global mientras que el RS es un fenómeno local [3]. En surge el caudal promedio a través de la turbomáquina es variable, mientras que en RS es estable [7]. Dada la naturaleza global del surge, que trasciende la zona del impulsor y se extiende a todo el sistema de bombeo, este se caracteriza por oscilaciones de presión y caudal que, además de generar vibraciones y reducir el desempeño de la turbomáquina, pueden amenazar su integridad estructural [6].

De otra parte, el RS se puede definir como una perturbación del flujo debida a recirculaciones que bloquean parcial o totalmente los canales entre álabes de los rotores o impulsores. Estas recirculaciones se dan por desprendimiento de flujo en la interfase fluido-superficie sólida de los álabes por cambio en la dirección del ángulo de ataque [6].

En bombas, tanto el surge como el RS se presentan en condiciones de operación de bajos caudales y a frecuencias subsincrónicas. Dada sus naturalezas periódicas, su caracterización se hace, entre otros métodos, por medio del análisis espectral y análisis de fase de las fluctuaciones de presión [1] [5] [9] [10] [11]. Los sensores se colocan normalmente en el impeler o en la voluta y el análisis de sus señales considera fundamentalmente la respuesta hidráulica de la turbomáquina. No obstante, los pulsos de presión generados por los fenómenos pueden repercutir también en los componentes mecánicos y eléctricos de la turbomáquina. Dada esta situación, resulta de interés conocer la respuesta de una turbomáquina en el ámbito mecánico ante la existencia de fenómenos subsincrónicos como el surge o el RS.

Teniendo en cuenta lo anterior, se definió como objetivo principal de esta investigación la caracterización de fenómenos hidrodinámicos subsincrónicos como el RS a partir de la respuesta hidráulica y mecánica de una bomba centrífuga de baja velocidad específica, haciendo uso de sensores de presión y de torque.

Métodos

Banco de pruebas

El banco de pruebas está conformado por un circuito cerrado de tuberías unido a un tanque de carga, un canal y la bomba objeto de estudio. La dirección del flujo en el circuito se puede controlar por medio de válvulas, posibilitando el funcionamiento de la turbomáquina objeto de estudio como bomba o como turbina. La energía para mover el agua en el circuito es suministrada por un banco de bombas [10]. El banco de pruebas hace parte del laboratorio de hidráulica de la universidad Eafit.

La bomba objeto de estudio corresponde a una ITT-Goulds de 1118.5 W de potencia nominal. Las principales especificaciones técnicas de esta se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de la bomba ITT-Goulds

Impulsor	
Diámetro externo	0.14764 m
Diámetro de referencia	0.08104 m
Número de álabes (curvados hacia atrás)	6
Tuberías de entrada y salida	



Diámetro de entrada (orificio de succión)	0.0635 m
Diámetro de salida (orificio de descarga)	0.0508 m
Especificaciones de diseño	
Velocidad específica (Ns)	35.7
Velocidad de rotación	29.167 s ⁻¹
Caudal	0.009 m ³ /s
Cabeza	7.7 m
Potencia mecánica	1118.5 Watts

La bomba de estudio fue operada a su velocidad de diseño, y para la obtención de diferentes puntos de operación se hizo variación de caudales desde 1.3×10^{-4} m³/s hasta 1.38×10^{-2} m³/s. Para este estudio fueron considerados 22 puntos de operación con cabezas hidráulicas entre 5.7 y 9.6 m.

Instrumentación y equipo de adquisición de datos

La instrumentación utilizada en el estudio con sus especificaciones técnicas se presenta en la tabla 2. Los sensores piezorresistivos de presión Wika A-10 (PiezoResistive Sensor, PRS, por su denominación en inglés) fueron instalados en la zona de alta y de baja presión de la bomba. El medidor de flujo GE TransPort PT878 fue instalado en la zona de descarga de la bomba. Las señales de estos instrumentos fueron utilizadas para determinar la energía específica por medio de la ecuación de Bernoulli y calcular los caudales en cada punto de operación.

Los sensores de presión piezorresistivo Futek PMP300 (PiezoResistive Sensor, PRS, por su denominación en inglés) y piezoeléctrico Dytran 2005V (PiezoElectric Sensor, PES, por su denominación en inglés) fueron instalados en la voluta. Sus señales fueron analizadas en el dominio del tiempo y de la frecuencia y los resultados se consideraron como patrón de comparación de los resultados obtenidos a través del sensor de torque Futek TRS600 FSH01998 (Torque Sensor, TS, por su denominación en inglés), el cual fue instalado en el eje de la bomba. Este sensor sirvió, además, para la determinación de la potencia mecánica. El tacómetro DT2234C+ fue usado para medir la velocidad de rotación en el eje de la bomba.

Las señales eléctricas de todos los instrumentos fueron recibidas y procesadas por medio de un equipo de adquisición de datos CompactRio® 9076 de National Instruments® y un software denominado Turbologger, desarrollado en ambiente LabView® por investigadores de la Universidad Eafit. El equipo de adquisición de datos se conformó con cuatro módulos de adquisición: dos NI-9232, un NI-9215 y un NI-9203. Las especificaciones técnicas generales de los módulos [12], se presentan en la tabla 3.

Tabla 2. Especificaciones técnicas de la instrumentación utilizada

Instrumento	RO (Rated Output)	Rango	Span	Linealidad	Repetibilidad	Histéresis	Sensibilidad
Wika A-10 en zona de baja presión	4 a 20 mA	-30mmHg a 100 psi	693476 Pa	≤ ±0.5 % del span	≤ 0.2 % del span	≤ ±1.4 % del span	-
Wika A-10 en zona de alta presión	4 a 20 mA	-30mmHg a 100 psi	693476 Pa	≤ ±0.5 % del span	≤ 0.1 % del span	≤ ±0.3 % del span	-



Dytran 2005V	0 a 5 VDC	0 a 50 psi	344738 Pa	±0.1 % del span	-	-	100 mV/psi
Futek PMP300	0 a 10 VDC	0 a 50 psi	344738 Pa	±0.5 % del RO	±0.1 % del RO	±0.16 % del RO	-
Futek TRS600 FSH01998	±5 VDC	-20 a 20 Nm	40 Nm	±0.2 % del RO	±0.2 % del RO	±0.1 % del RO	-
GE TransPort PT878	4 a 20 mA	-10 l/s a 20 l/s (para la configuración del instrumento en las mediciones)	30 l/s	-	±0.1% a ±0.3% de la lectura	-	-
DT2234C+	0 a 5 V	2.5 a 99999 rpm	99996.5 rpm	-	-	-	0.1 rpm (2.5 a 999.9 rpm) 1 rpm (1000 a 99999)

Tabla 3. Especificaciones técnicas de los módulos de adquisición

Módulo	Filtro anti alias	Número de canales	Rangos de señal	Máxima velocidad de muestreo	Resolución
NI-9232	Si	3	±30 V	102.4 Ks/s/ch	24 bits
NI-9215	No	4	±10 V	100 Ks/s/ch	16 bits
NI-9203	No	8	±20 mA	200 Ks/s/ch	16 bits

Todas las señales fueron registradas simultáneamente a una tasa de 20480 muestras por segundo y constituidas por 655360 datos (32 segundos) para cada una de las variables consideradas en cada punto de operación; tales parámetros corresponden a una frecuencia máxima observable de 10240 Hz con una resolución de 0.03125 Hz.

Curvas características

Las curvas características de la bomba fueron construidas con números adimensionales, de acuerdo con lo establecido en la norma IEC-60193:1999 [13]. Para ello se utilizaron los coeficientes de energía y caudal, y eficiencia, definidos de la siguiente manera:

$$E_{nD} = \frac{E}{n^2 D^2} \quad (1)$$

$$Q_{nD} = \frac{Q_1}{n D^3} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{P_h}{P_m} \quad (3)$$

Donde,

E: Energía específica del agua entre las secciones de referencia de baja y alta presión.

n: Número de revoluciones por unidad de tiempo

D: Diámetro de referencia

Q₁: Caudal

ρ: Densidad



Pm: Potencia mecánica

Ph: Potencia hidráulica

Análisis de señales

El análisis de señales se realizó en tres partes. En la primera, se tomaron las señales de los sensores instalados en la máquina, y por medio de análisis espectral se determinaron los puntos donde se sugiere la existencia de RS. En la segunda, se analizó la similitud de las señales de todos los sensores por el método del espectro cruzado. Y en la tercera, se realizó un análisis de fase por el método de la correlación cruzada para estimar el número de onda en cada uno de los componentes espectrales de interés.

Las señales de presión fueron representadas adimensionalmente como coeficientes de fluctuación de presión (\tilde{P}_E) y sus frecuencias como coeficientes de frecuencia (f_n), definidos de acuerdo con la norma IEC60193:1999 [13] de la siguiente forma:

$$\tilde{P}_E = \frac{p - \bar{p}}{\rho E} \quad (4)$$

$$f_n = \frac{f}{n} \quad (5)$$

Donde,

p: presión [Pa]

\bar{p} : presión media [Pa]

f: frecuencia [Hz]

Resultados y discusión

Curvas características

En la figura 1 se presentan las curvas características E_{nD} - Q_{nD} y η - Q_{nD} . En ellas se observan tres puntos de operación de interés (Operation Point, OP, por su denominación en inglés), OP4, OP7 y OP11, ubicados en la zona de carga parcial de caudal. En el OP4 ($Q_{nD}=0.1124$, $E_{nD}=16.84$) hay un cambio de signo de pendiente en la curva E_{nD} - Q_{nD} . En el OP7 ($Q_{nD}=0.2095$, $E_{nD}=16.78$) y el OP11 ($Q_{nD}=0.4109$, $E_{nD}=15.78$) hay unos leves hundimientos claramente perceptibles en la curva η - Q_{nD} . Estos hundimientos representan una disminución en la eficiencia, estimada entre el 1 y 1.5%, si se toma como base de comparación una curva que se ajuste a los puntos aledaños a los puntos en cuestión.

La literatura sugiere que este tipo de irregularidades o cambios en el signo de la pendiente pueden estar asociados a fenómenos hidrodinámicos [14] [13].

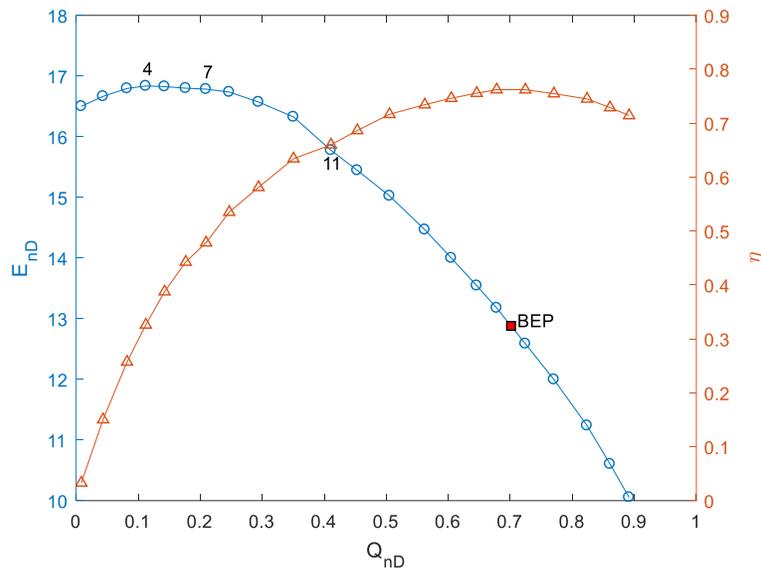


Figura 1. Curvas características $E_{nD}-Q_{nD}$ y $\eta-Q_{nD}$

Análisis espectral

El análisis de señales en el dominio del tiempo y de la frecuencia se realizó sobre todos los puntos de operación. De allí se identificaron cuatro puntos con componentes espectrales que sugieren la presencia de fenómenos hidrodinámicos caracterizados por lo que, se presume, son variaciones de presión que se manifiestan en todo el sistema hidráulico y mecánico. Dos de estos puntos corresponden a los OP4 y OP11, donde se identificaron irregularidades en las curvas $E_{nD}-Q_{nD}$ y $\eta-Q_{nD}$. Los otros dos puntos, OP5 y OP8, son próximos a las zonas de irregularidades en las curvas características. Por tratarse de fenómenos subsíncronicos, el análisis espectral se hizo sobre componentes espectrales con frecuencias menores que 29 Hz o coeficientes de frecuencia menores que 0.99.

A modo de ilustración, en la figura 2 se presentan los espectros de las señales de todos los sensores en los puntos de operación OP5 y OP8.

En la figura 2 a) se observa claramente un componente en $f_n=0.087$ en todos los espectros. De manera similar, en la figura 2 b) se observa uno en $f_n=0.084$. De acuerdo con estos espectros, la respuesta hidráulica tiene correspondencia con la respuesta mecánica, ya que los componentes espectrales corresponden al mismo coeficiente de frecuencia y tienen una amplitud claramente diferenciable en esos componentes.

En la tabla 4 se presentan los puntos de operación identificados con sus respectivos coeficientes de frecuencia para cada uno de los sensores. En el OP 11 se presentaron dos componentes espectrales de interés, uno de los cuales tiene correspondencia en todos los sensores ($f_n=0.0241$), y el otro en los cuatro sensores de presión ($f_n=0.0777$) y no en el de torque. Este componente será objeto de análisis más adelante.

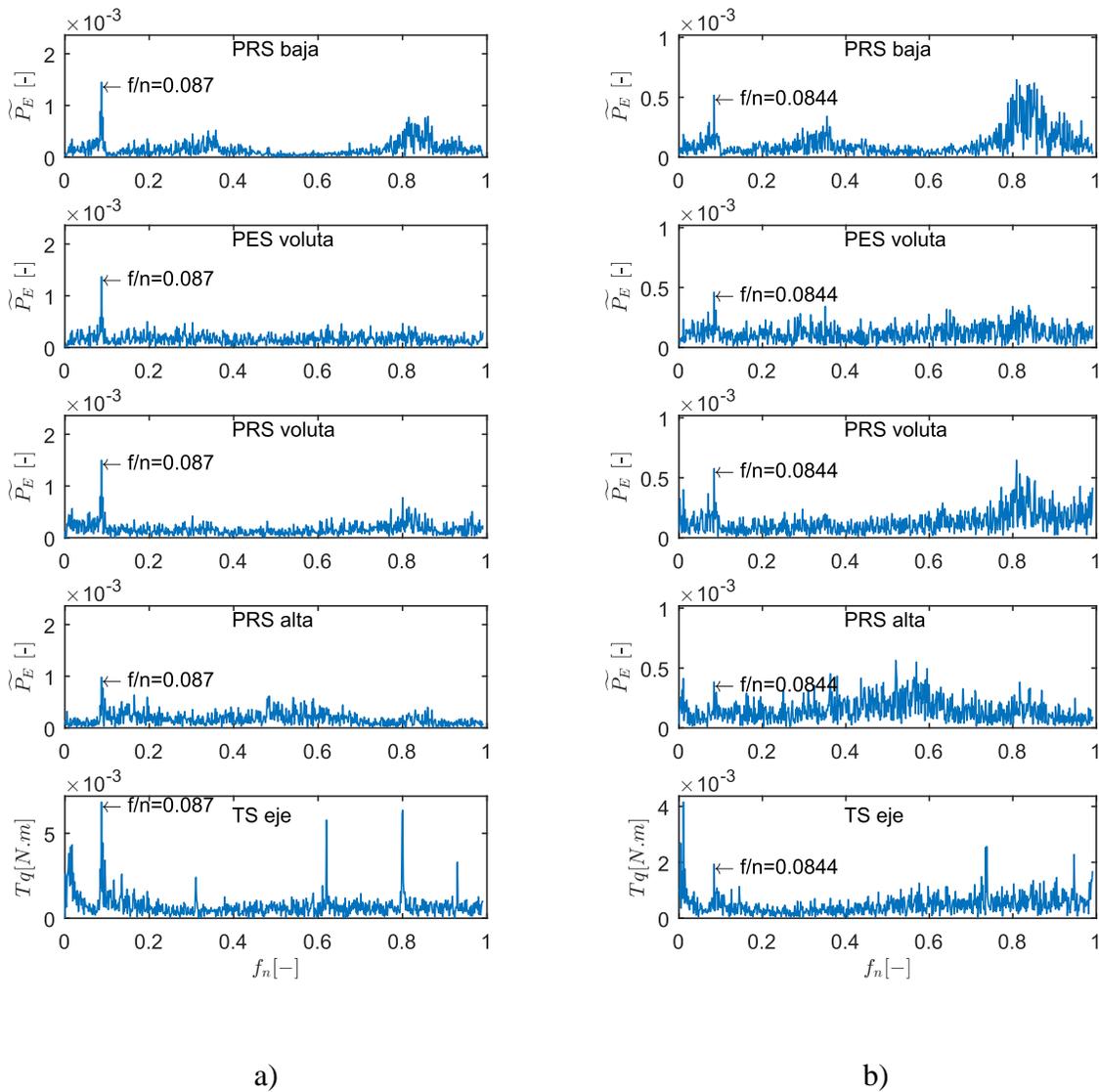


Figura 2. Espectros de todas las señales en los puntos de operación 5, a), y 8, b).

Tabla 4. Puntos de operación y componentes espectrales donde se sugiere la existencia de fenómenos subsincrónicos

OP	Q _{nd}	E _{nd}	Factor de frecuencia (fn)				
			PRS baja	PES voluta	PRS voluta	PRS alta	TS eje
4	0.1124	16.8358	0.0857	0.0857	0.0857	0.0857	0.0857
5	0.1426	16.8259	0.0870	0.0870	0.0870	0.0870	0.0870
8	0.2468	16.7360	0.0844	0.0844	0.0844	0.0844	0.0844
11	0.4109	15.7761	0.0241	0.0241	0.0241	0.0241	0.0241
11	0.4109	15.7761	0.0777	0.0777	0.0777	0.0777	0.0817



Para determinar si los componentes espectrales identificados en la tabla 4 corresponden a frecuencias dominantes percibidas en todos los sensores, y a su vez, poderlos comparar entre sí, se utilizó el método del espectro cruzado para este fin. Se tomó como señal patrón la señal del sensor piezoeléctrico instalado en la voluta (PES voluta) y con base en esta se realizó la correlación espectral con las otras señales. En la figura 3 se presentan estos resultados en el intervalo de f_n entre 0 y 0.2, en términos del espectro de densidad de potencia (Power Spectral Density, PSD, por su denominación en inglés). El intervalo escogido corresponde a la zona donde se identificaron los componentes espectrales comunes a todas las señales.

El método del espectro cruzado permite determinar la similitud entre dos señales, y de esta manera, identificar los componentes espectrales dominantes, caracterizados por tener cantidades de “masa” espectral (potencia o energía, en realidad) significativamente mayor que la de otros componentes.

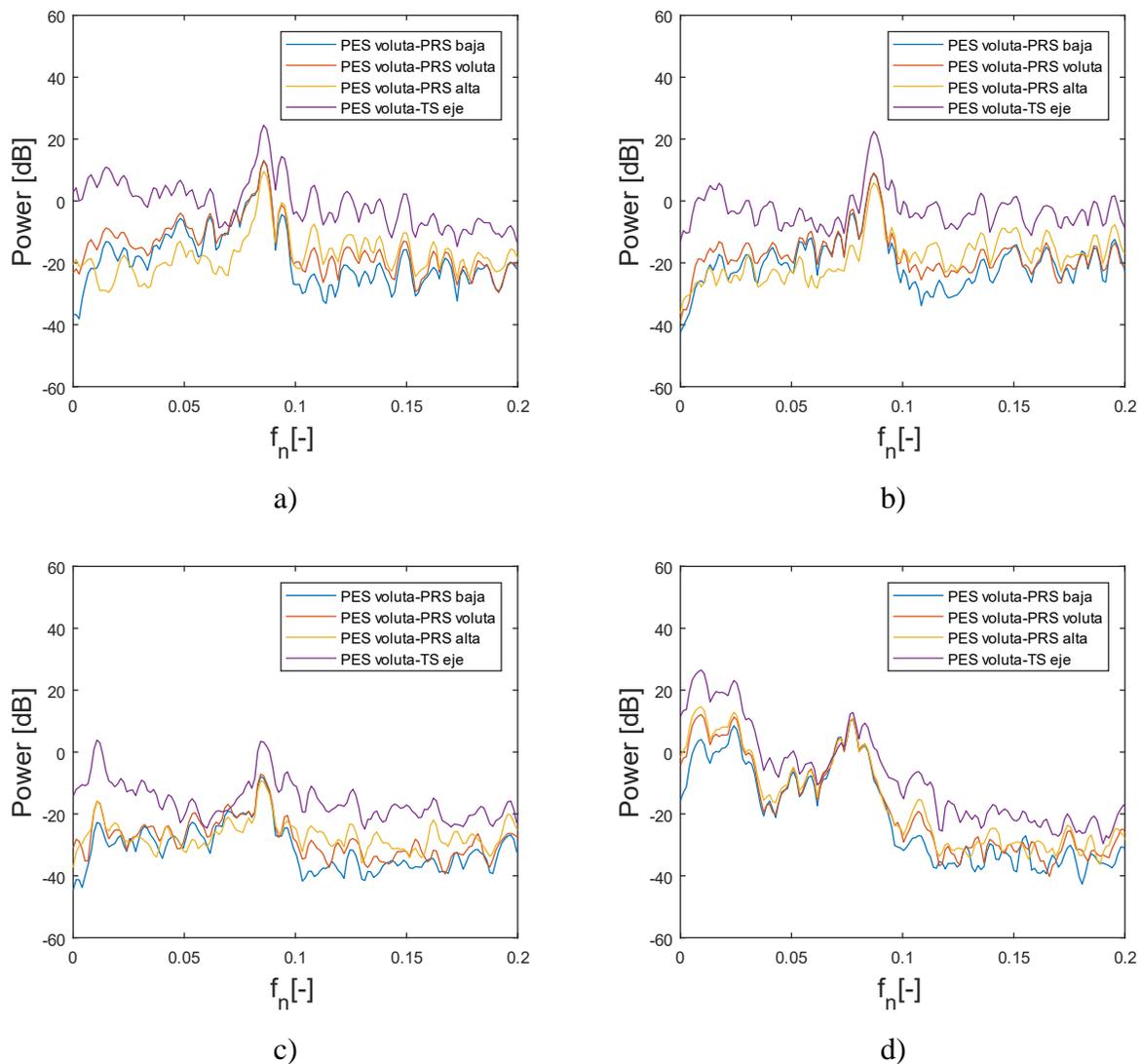


Figura 3. a) PSD para el OP4, b) PSD para el OP5, c) PSD para el OP8 y d) PSD para el OP11.



En las gráficas de la figura 3 se puede observar que hay una gran similitud, en términos de preponderancia del componente espectral y su magnitud de densidad espectral, entre la señal del PES voluta y las otras señales, en lo que atañe a los componentes espectrales de interés señalados en la tabla 4. Para todos estos componentes espectrales es mayor la densidad espectral de la señal del sensor de torque, excepto en el caso de $f_n=0.0777$ del OP11, donde la densidad espectral es prácticamente la misma en todos los sensores. En este componente cabe resaltar que, si bien el espectro de la señal de torque no lo mostró como predominante, el espectro cruzado si lo hizo, presentando una clara semejanza de este componente en las señales de torque y de presión. De allí se pone de manifiesto que el componente espectral refleja el mismo fenómeno hidrodinámico en las señales de los dos sensores.

Dicho lo anterior, se infiere que los fenómenos hidrodinámicos, caracterizados por los componentes espectrales señalados en la tabla 4, tienen respuestas equiparables en los sistemas hidráulico y mecánico de la bomba objeto de estudio.

Análisis de fase

Estudios sobre RS en bombas centrífugas reportan el fenómeno a frecuencias entre el 5 y 10% de las frecuencias de rotación del impulsor [14] [15] [16]. Sin embargo, y teniendo en cuenta que fenómenos como el surge se asemejan al RS y se pueden confundir con éste [7], se realizó un análisis de fase para dilucidar el origen de los componentes espectrales de interés. Para ello se consideraron las señales de los dos sensores de presión localizados en la voluta y que se instalaron con una separación de 30° . Las señales fueron filtradas digitalmente por los métodos Elíptico, Butterword, Chebychev tipo 1 y Chebychev tipo 2. La respuesta en amplitud y fase de la señal filtrada se comparó gráficamente con la señal original para determinar el método más adecuado para estimar el número de onda en cada uno de los componentes de interés. Se usaron filtros pasabanda en todos los componentes, excepto en $f_n=0.0241$ donde se usó un pasabajo. El ancho de banda empleado en todos los casos fue de 1Hz centrado con respecto al componente espectral de interés en cada punto de operación. En la figura 4 se muestran las comparaciones de las señales filtradas con las originales para el OP5 a modo de ejemplo.

Los resultados del análisis de fase se presentan en la tabla 5. De los cinco componentes analizados, dos estarían en fase ($k=0$) y tres no estarían en fase ($k>0$). Los componentes en fase sugieren oscilaciones de presión y caudal que involucran todo el sistema hidráulico, posiblemente un surge, y los componentes que no están en fase sugieren la existencia de un RS.

Tabla 5. Análisis de fase para los componentes espectrales de interés

OP	Q_nD	E_nD	f_n	Desfase ($^\circ$)	Método de filtrado	k	k ajustado
4	0.1124	16.8358	0.0857	18.7	Elíptico	0.581	1
5	0.1426	16.8259	0.0870	19.5	Butterword	0.581	1
8	0.2468	16.7360	0.0844	7.5	Butterword	0.423	0
11	0.4109	15.7761	0.0777	7.5	Elíptico	0.386	0
11	0.4109	15.7761	0.0241	38.5	Elíptico pasabajo	1.283	1

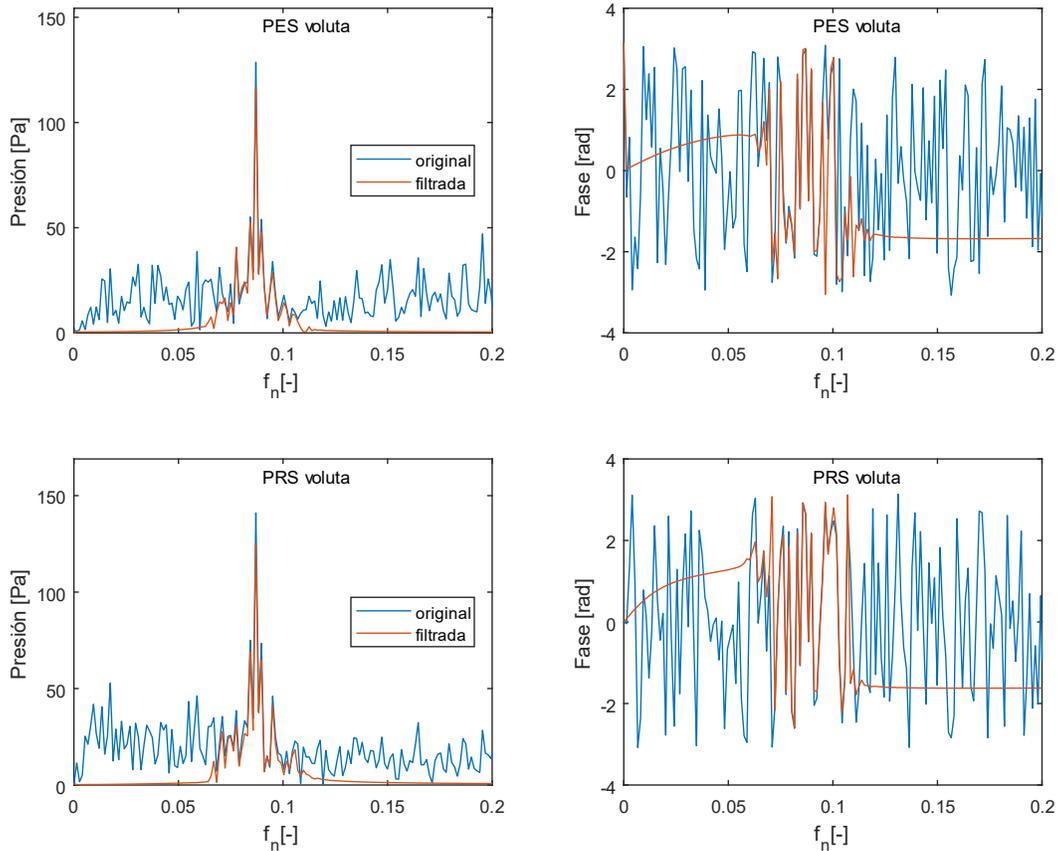


Figura 4. Respuesta en amplitud y en fase de las señales filtradas para el OP5, $f_n=0.0870$

Conclusiones

Estudios previos realizados sobre la misma máquina han sugerido, a partir de análisis de patrones espectrales generales, la existencia de RS. Esto en la zona comprendida entre $Q_{nD}=0.101$ y $Q_{nD}=0.143$ [17]. Sin embargo, los resultados obtenidos en la presente investigación sugieren que el fenómeno también se puede encontrar en otra zona de la curva característica $Q_{nD}-E_{nD}$ (alrededor de $Q_{nD}=0.4109$). Además, los resultados muestran la posible presencia de otros fenómenos hidrodinámicos como el surge, fenómeno que no fue identificado en el estudio referenciado.

Los puntos de operación analizados (OP4, OP5, OP8 y OP11) muestran que los efectos de los fenómenos hidrodinámicos presentes en la turbomáquina se pueden percibir en los sistemas hidráulico y mecánico, traspasando la zona de interacción rotor-estator. Adicionalmente, comprueban una buena correspondencia en los componentes espectrales de las señales de los sensores de presión con las señales del sensor de torque.

En el OP11 se observan dos fenómenos hidrodinámicos diferentes, un posible surge y un posible RS, lo cual no resulta extraño si se tiene en cuenta que esta situación ha sido observada en turbocompresores [7]. En este punto de operación llama la atención la existencia de un posible RS a una frecuencia muy baja, a 2.4% de la frecuencia de rotación de la máquina, por debajo de lo encontrado en los estudios de referencia para este trabajo.



La posible existencia de fenómenos hidrodinámicos como el surge o el RS en los OP7 y OP11 sugieren una reducción en la eficiencia del 1 al 1.5%.

Agradecimientos

Los autores quieren expresar su gratitud a la Dirección de Investigación, el laboratorio de Hidráulica, el laboratorio de Metrología y el laboratorio de Mecatrónica de la universidad EAFIT, por todo el soporte técnico y logístico brindado para el desarrollo de esta investigación.

Referencias

- [1] S. Berten, P. Dupont, L. Fabre, M. Kayal, F. Avellan y M. Farhat, «Experimental Investigation of Flow Instabilities and Rotating Stall in a High Energy Centrifugal Pump Stage,» de *Proceedings of the ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting*, Colorado, 2009.
- [2] D. Valentin, A. Presas, E. Egusquiza, C. Valero, M. Egusquiza y M. Bossio, «Power Swing Generated in Francis Turbines by Part Load and Overload Instabilities,» *Energies*, vol. 10, n° 12, pp. 1-17, 2017.
- [3] P. B. Lawless y S. Fleeter, «Prediction of Active Control of Subsonic Centrifugal Compressor Rotating Stall,» *AIAA Journal*, vol. 35, n° 12, pp. 1829-1836, 1997.
- [4] J. P. Bons, «Dynamic Surge Behavior of a Centrifugal Pumping System,» de *International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*, Hage, 1994.
- [5] O. Braun, «Part Load Flow in Radial Centrifugal Pumps,» Thesis PhD, EPFL, Lausanne, 2009.
- [6] C. E. Brennen, «Pump Vibration,» de *Hydrodynamics of Pumps*, Concepts NREC and Oxford University Press, 1994.
- [7] I. J. Day, «Stall, Surge, and 75 Years of Research,» *Journal of Turbomachinery*, vol. 138, n° 1, pp. 011001-1 - 011001-16, 2016.
- [8] E. Sundstrom, B. Semlitsch y M. Mihaescu, «Generation Mechanisms of Rotating Stall and Surge,» *Flow Turbulence Combust*, vol. 100, n° 3, pp. 705-719, 2018.
- [9] V. Hasmatuchi, M. Farhat, S. Roth, F. Botero y F. Avellan, «Experimental Evidence of Rotating Stall in a Pump Turbine at Off-Design Conditions in Generating Mode,» *Journal of Fluids Engineering*, vol. 133, n° 5, pp. 051104-1-051104-8, 2011.
- [10] H. Bolaños Arias, «Fenómenos Hidrodinámicos Periódicos en una Bomba Centrífuga de Baja Velocidad Específica,» Trabajo de Grado de Maestría, Universidad Eafit, Medellín, 2018.
- [11] C. Li, . S. Xu y . Z. Hu, «Experimental Study of Surge and Rotating Stall Occurring in Highspeed,» *Procedia Engineering*, vol. 99, pp. 1548-1560, 2015.
- [12] National Instruments, [En línea]. Available: <http://www.ni.com/en-us/support.html>. [Último acceso: 26 Agosto 2017].
- [13] International Electrotechnical Commission, «CEI/IEC 60193. Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines, Model acceptance tests.,» Switzerland, 1999.
- [14] M. Sinha, A. Pinarbasi y J. Katz, «The Flow Structure During Onset and Developed States of Rotating Stall Within a Vaned Diffuser of a Centrifugal Pump,» *Journal of Fluids Engineering*, vol. 123, n° 9, pp. 490-499, 2001.



- [15] U. Ullum, J. Wright, O. Dayi, A. Ecker, A. Soulimani, R. Piché y H. Kamath, «Prediction of rotating stall within an impeller of a centrifugal pump based on spectral analysis of pressure and velocity data,» *Journal of Physics*, vol. 52, pp. 36-45, 2006.
- [16] D. A. Johnson, N. Pedersen y C. B. Jacobsen, «Measurements of Rotating Stall Inside a Centrifugal Pump Impeller,» de *Proceedings of ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*, Houston, 2005.
- [17] H. Bolaños Arias, D. Tobón, J. Pérez y F. Botero, «Subsynchronous phenomena in a low specific speed centrifugal pump,» de *Proceedings of III Latinamerican Hydro Power and Systems Meeting*, Quito, 2017.



Diseño Óptimo de un Árbol de Transmisión con Materiales Compuestos

Optimal Design of a Drive Shaft with Composite Materials

Derlis Hernández-Lara^{1,2,γ}, Emmanuel Alejandro Merchán-Cruz¹, Ricardo Gustavo Rodríguez-Cañizo¹, Álvaro Marcos Santiago-Miguel¹

1. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Azcapotzalco, Instituto Politécnico Nacional, CDMX, México
 2. Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Tecnológico Nacional de México, Ecatepec de Morelos, Estado de México
- γ. Autor correspondiente: derlis392@hotmail.com*

Resumen

Este trabajo presenta la utilización de metaheurísticas para apoyar al diseño de un árbol de transmisión hecho con materiales compuestos como una propuesta de metodología robusta, con el fin de obtener los parámetros adecuados de diseño. El problema en este tipo de diseños, es encontrar el espesor adecuado de la pieza, es decir el número de láminas y su respectiva orientación que la conformarán, para lo cual existen demasiadas posibilidades al trabajar con laminados de materiales compuestos. Las consideraciones más importantes se basan en la teoría clásica de laminados, el proceso de fabricación y las cargas externas a las que estará sometida la pieza, las cuales deben considerarse en la metaheurística utilizada para buscar la mejor solución posible. Los resultados experimentales muestran que este tipo de implementaciones son de gran utilidad para resolver problemas de optimización en el diseño con materiales compuestos y para diversas aplicaciones en ingeniería.

Palabras clave: Diseño con materiales compuestos, árbol de transmisión, optimización con metaheurísticas.

Abstract

This paper presents the use of metaheuristics to support the design of a drive shaft made with composite materials as a proposal of robust design methodology, in order to obtain the appropriate design parameters. The problem in this type of design, is to find the adequate thickness of the piece, that is to say the number of sheets and their respective orientation that will form it, for which there are too many possible combinations when working with laminates of composite materials. The most important considerations are based on the classic theory of laminates, the manufacturing process and the external loads to which the piece will be subjected, which must be considered in the metaheuristics used to find the best possible solution. The experimental results show that this type of implementations is very useful to solve problems of optimization in the design with composite materials and for diverse engineering applications.

Keywords: Design with composite materials, drive shaft, optimization with metaheuristics.

Introducción

Uno de los principales objetivos al implementar metaheurísticas en problemas de optimización, es el de resolver situaciones complejas y buscar soluciones factibles. En las últimas décadas las industrias como la aeronáutica y la automotriz prefieren utilizar materiales compuestos en lugar de



materiales tradicionales, debido a su excelente relación resistencia/peso y alta rigidez específica. Otra ventaja de usar materiales compuestos es que la estructura se puede diseñar seleccionando la fibra y las orientaciones adecuadas para cumplir con los requerimientos solicitados. Un problema clásico de diseño con materiales compuestos tiene gran cantidad de variables discretas, como el número de láminas, orientación de las mismas, espesor y tipo de material. La flexibilidad en seleccionar estas variables para cumplir con los requisitos introduce complejidad en el problema de diseño. Conociendo algunos parámetros desde el inicio, el diseño de una estructura mediante materiales compuestos se reduce para buscar orientaciones discretas de capas apropiadas y parámetros geométricos en un rango dado para lograr la resistencia y rigidez requeridas [1].

En trabajos previos se han utilizado metaheurísticas para el diseño en ingeniería, por ejemplo, en [2] se realizó la optimización y selección de vigas mediante la metodología de diseño paramétrico y algoritmos genéticos, variando así las secciones transversales de las vigas de estudio, con el fin de optimizarlas para soportar cargas específicas sin fracturarse. En [3] formularon una metodología de diseño óptimo multiobjetivo de vigas de pared delgada PRF (Plásticas Reforzadas con Fibras); El problema de optimización se plantea de manera de considerar restricciones estructurales y geométricas preestablecidas en el diseño, proponen minimizar el peso de la estructura conjuntamente con los desplazamientos máximos producidos, para lo cual usan la metaheurística SA (*Simulated Annealing*) empleando dos esquemas de búsqueda diferentes.

En [1] utilizaron optimización por enjambre de partículas (PSO) y algoritmos genéticos (AG) para el diseño de una viga hueca, con un enfoque multiobjetivo, el diseño de la viga fue hecho con materiales compuestos y aplicación para la industria aeronáutica, los resultados mostraron que PSO obtuvo mejores resultados que el AG para este tipo de diseños. En [4] se diseñó un árbol de transmisión para vehículos automotores hecho de materiales compuestos, la metodología de diseño implicó encontrar la combinación adecuada del material para que la pieza no falle en su funcionamiento, en este trabajo se utilizó un algoritmo propuesto por el autor, los resultados obtenidos fueron satisfactorios. En [5] usaron algoritmos genéticos para diseñar un árbol de transmisión, obteniendo el espesor y la secuencia de apilamiento óptima de materiales compuestos para la pieza, para este caso diseñaron con fibra de vidrio y fibra de carbono e hicieron la comparación con respecto al diseño con acero.

Desarrollo del trabajo

De acuerdo a la literatura, las metaheurísticas pueden adaptarse al diseño con materiales compuestos, ya que son métodos de optimización global y pueden utilizarse para problemas no lineales o de variables discretas. Para este caso se analiza el sistema como se observa la figura 1, donde las consideraciones a realizar en el diseño de una pieza hecha con materiales compuestos son, las cargas externas aplicadas, la teoría clásica de laminados y el proceso de fabricación.



Figura 1. Elementos a considerar en el diseño con materiales compuestos.

Teoría clásica de laminados

En este caso de estudio se considera un laminado simétrico, para que la pieza no se pandee después del proceso de curado, como se muestra en la figura 2.

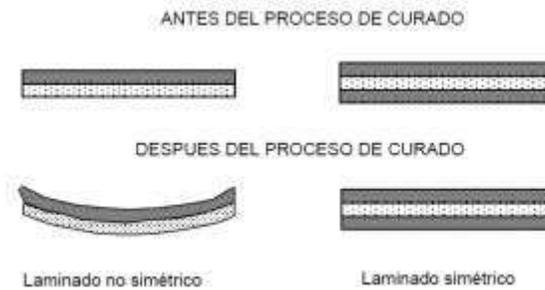


Figura 2. Laminado simétrico [6].

Para diseñar tomando en cuenta los esfuerzos aplicados al árbol de transmisión y las reacciones internas que se producen en el material, se tiene que aplicar la teoría clásica de laminados. Para crear una relación lineal entre tensión-deformación para un material anisótropo se parte de la teoría de elasticidad como se muestra en la ecuación 1, mediante la ley de Hooke generalizada [4].

$$\{\sigma_{ij}\} = [Q_{ij}]\{\epsilon_{ij}\} \quad \text{Siendo } i, j=1, 2, 3, 4, 5, 6. \quad (1)$$

Donde $[Q_{ij}]$ recibe el nombre de la matriz de rigidez. Para un material genérico, esta matriz tiene 36 componentes para definir completamente el material, como se muestra en la ecuación 2.

$$[Q_{ij}] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & Q_{14} & Q_{15} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} & Q_{24} & Q_{25} & Q_{26} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} & Q_{34} & Q_{35} & Q_{36} \\ Q_{41} & Q_{42} & Q_{43} & Q_{44} & Q_{45} & Q_{46} \\ Q_{51} & Q_{52} & Q_{53} & Q_{45} & Q_{55} & Q_{56} \\ Q_{61} & Q_{62} & Q_{63} & Q_{46} & Q_{65} & Q_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$



Para este tipo de diseños los laminados de fibra de carbono son delgados y no se aplican cargas fuera del plano, se consideran como problemas de deformación plana, y se definen como se muestra en las ecuaciones 3 y 4.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [Q] \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

La matriz de rigidez para cada lámina queda definida por las ecuaciones 5 y 6.

$$[Q_{ij}] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[Q_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{12}E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{12}E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Donde: E_{ij} =módulo de elasticidad en el eje correspondiente.

ν_{12} =Coeficiente de Poisson en XY.

La matriz $[Q_{ij}]$ está expresada en ejes locales. Para convertir esta matriz en ejes globales se necesita operar con la matriz de transformación como se muestra en las ecuaciones 7 y 8.

$$\{\sigma'_{ij}\} = [\overline{Q}_{ij}]\{\varepsilon'_{ij}\} \quad \text{Siendo } i, j=1, 2, 6. \quad (7)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{21} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

En las ecuaciones de la 9 a la 14 se muestra el cálculo para cada variable anterior, de acuerdo a la orientación de las fibras respecto al eje local [5].

$$\overline{Q}_{11} = Q_{11}c^4 + Q_{22}s^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})c^2s^2 \quad (9)$$



$$\overline{Q_{12}} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})c^2s^2 + Q_{12}(c^4 + s^4) \quad (10)$$

$$\overline{Q_{16}} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})c^3s - (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})cs^3 \quad (11)$$

$$\overline{Q_{22}} = Q_{11}s^4 + Q_{22}c^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})c^2s^2 \quad (12)$$

$$\overline{Q_{26}} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})s^3c - (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})sc^3 \quad (13)$$

$$\overline{Q_{66}} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})c^2s^2 + Q_{66}(c^4 + s^4) \quad (14)$$

Las ecuaciones anteriores se obtuvieron tomando en cuenta el esquema mostrado en la figura 3.

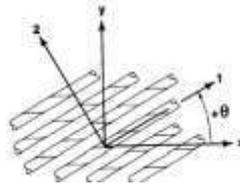


Figura 3. En las expresiones anteriores: $c=\cos\theta$ y $s=\sen\theta$ [5].

Según la teoría clásica de placas laminadas, la ecuación constitutiva se puede escribir como en se muestra en la ecuación 15.

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ k \end{Bmatrix} \quad (15)$$

Donde:

ε^0 =Vector de deformaciones en el plano medio

k =Curvaturas en la lámina

La forma completa de la expresión anterior se observa en la ecuación 16.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} & B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} & D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \quad (16)$$

Las direcciones de las cargas y momentos aplicados a cada lamina que constituye el árbol de transmisión se muestran en la figura 4.

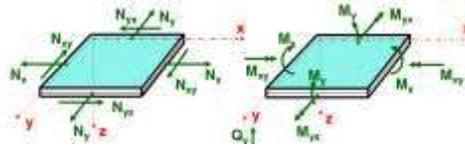


Figura 4. Las fuerzas y los momentos están acoplados por la matriz $[B]$. Están definidos por unidad de longitud del lado sobre el que actúan [6].

Al considerar un laminado simétrico, resulta que $[B_{ij}]=0$, por lo que se simplifica la ecuación 16 y se obtiene las ecuaciones 17 y 18.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

Donde para calcular los coeficientes A, B y D, se ocupan las ecuaciones de la 19 a la 21.

$$[A_{ij}] = \sum_{k=1}^n [\overline{Q}_{ij}]_k (z_k - z_{k-1}) = \sum_{k=1}^n [\overline{Q}_{ij}]_k t_k \quad (19)$$

$$[B_{ij}] = \sum_{k=1}^n [\overline{Q}_{ij}]_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad (20)$$

$$[D_{ij}] = \sum_{k=1}^n [\overline{Q}_{ij}]_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (21)$$

Las deformaciones en cada lamina están dadas por las ecuaciones 22 y 22.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{26} \\ a_{16} & a_{26} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} \quad (22)$$

$$\begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{26} \\ d_{16} & d_{26} & d_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} \quad (23)$$



Donde:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{a}_{11} & \mathbf{a}_{12} & \mathbf{a}_{16} \\ \mathbf{a}_{21} & \mathbf{a}_{22} & \mathbf{a}_{26} \\ \mathbf{a}_{16} & \mathbf{a}_{26} & \mathbf{a}_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} & \mathbf{A}_{16} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} & \mathbf{A}_{26} \\ \mathbf{A}_{16} & \mathbf{A}_{26} & \mathbf{A}_{66} \end{bmatrix}^{-1} \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{d}_{11} & \mathbf{d}_{12} & \mathbf{d}_{16} \\ \mathbf{d}_{21} & \mathbf{d}_{22} & \mathbf{d}_{26} \\ \mathbf{d}_{16} & \mathbf{d}_{26} & \mathbf{d}_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{11} & \mathbf{D}_{12} & \mathbf{D}_{16} \\ \mathbf{D}_{21} & \mathbf{D}_{22} & \mathbf{D}_{26} \\ \mathbf{D}_{16} & \mathbf{D}_{26} & \mathbf{D}_{66} \end{bmatrix}^{-1} \quad (25)$$

A partir de los cálculos anteriores, se calculan las deformaciones en cada lámina en ejes globales, según las ecuaciones 26 y 27:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{21} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}_k \quad (26)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}_k = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \mathbf{Z} \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \quad (27)$$

En la ecuación 27, el primer término corresponde al de deformaciones en el plano medio y el segundo al vector de curvaturas.

Metaheurística implementada: Optimización por enjambre de partículas

La optimización por enjambre de partículas (PSO) es una técnica de búsqueda desarrollada por el Dr. Eberhart y el Dr. Kennedy en 1995, inspirada en el comportamiento social de las aves, y que corresponde al tipo de inteligencia de enjambre, tiene sus raíces en la vida artificial, psicología social, ingeniería y ciencias de la computación [7]. De acuerdo a [8] PSO es un método adaptativo que utiliza agentes o partículas que se mueven a través de un espacio de búsqueda utilizando los principios de: Evaluación, Comparación e Imitación.

El proceso comienza con una población inicial aleatoria, y la búsqueda de la solución óptima se realiza según avanzan las iteraciones. Las posibles soluciones, llamadas partículas, vuelan por el espacio de búsqueda siguiendo las partículas óptimas actuales. Cada partícula realiza un seguimiento de sus coordenadas en el espacio de búsqueda, que se asocian con la mejor posición actual (*fitness*). El valor de la mejor posición actual se denomina *pbest*, y será almacenado en una base de datos. Cuando una partícula vecina de la posición óptima actual encuentra una posición mejor, almacena la nueva posición óptima con el nombre de *lbest*. A medida que se descubren nuevas y mejores posiciones, éstas pasan a orientar los movimientos de las partículas. Cuando una partícula ha recorrido todo el espacio de búsqueda, la posición óptima global se almacena con el nombre de *gbest*.



En la figura 5 se muestra el diagrama de flujo de la operación del algoritmo PSO aplicado al diseño del árbol de transmisión. En PSO, en cada iteración, cada x_i se renueva dependiendo de dos valores, el óptimo local x_i , y el óptimo global x . la renovación se realiza según las ecuaciones 28 y 29.

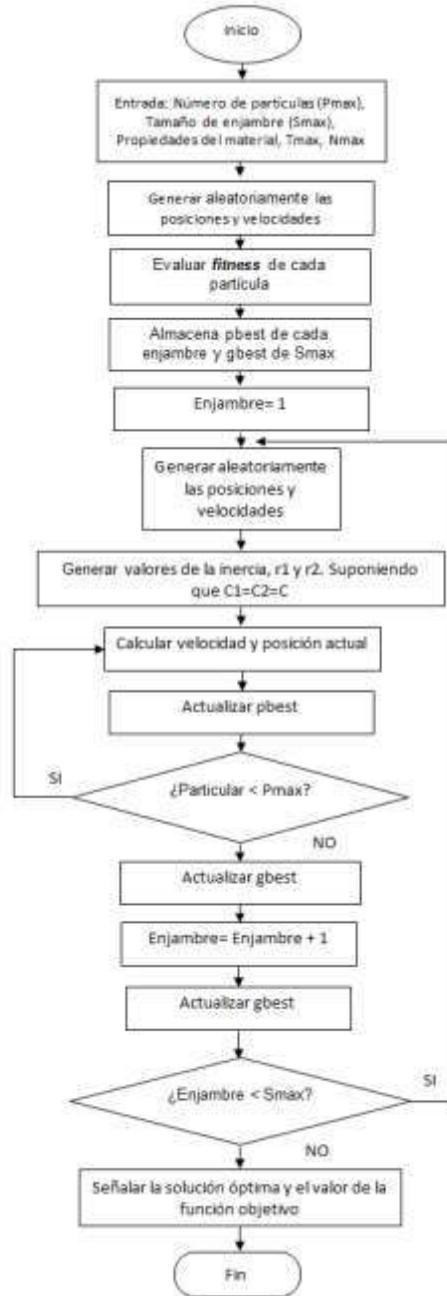


Figura 5. Diagrama de flujo de PSO aplicado al diseño de un árbol de transmisión con materiales compuestos.

$$v_{i,j}(t + 1) = wv_{i,j}(t) + c_1r_1[p_{i,j} - x_{i,j}(t)] + c_2r_2[p_{g,j} - x_{i,j}(t)] \quad (28)$$



$$x_{i,j}(t + 1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t + 1), j = 1, 2, \dots, \text{número de laminas} \quad (29)$$

El método de PSO consiste en que, en cada paso de tiempo, se produce un cambio de la velocidad de cada partícula. La aceleración de cada partícula se genera a partir de un término aleatorio. En los últimos años, la optimización por enjambre de partículas ha sido aplicada en muchas investigaciones y casos ingenieriles. Está demostrado que la optimización por enjambre de partículas obtiene mejores resultados de forma más rápida y más económica comparado con otros métodos [4].

Planteamiento del problema de optimización

Diseñar un árbol de transmisión con materiales compuestos (figura 6), en donde las variables a optimizar son el número de láminas y la secuencia de apilamiento, suponiendo que el laminado es simétrico. La función objetivo establecida para este problema es la masa del árbol de transmisión, como se muestra en la ecuación 30.

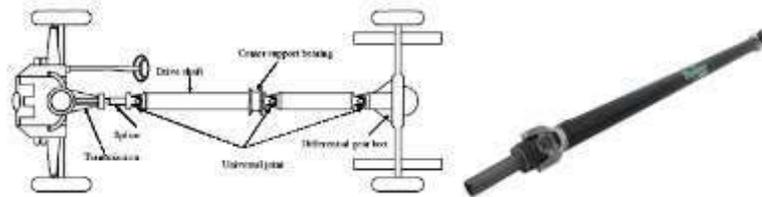


Figura 6. Árbol de transmisión de materiales compuestos [5].

$$\min \quad f(x) = m = \rho \frac{\pi}{4} (d_0^2 - d_i^2) L \quad (30)$$

$$\text{vector de las variables de diseño} \quad x = [n, \theta_k, d_i]$$

Sujeto a las siguientes restricciones de diseño:

$$n > 1, \quad \text{donde } n \in \text{números enteros}$$

$$-90 \leq \theta_k \leq 90$$

$$T_{cr} \geq T_{max}$$

$$N_{cr} \geq N_{max}$$

$$\text{Si se ha producido rotura} \rightarrow m = \infty$$

Donde:

ρ = densidad del material

n =número de láminas

θ_k =orientación de las fibras

d_i =espesor del árbol

d_o =diámetro exterior

m =masa

T_{cr} =resistencia a deformación por torsión

T_{max} =par de servicio

N_{cr} =frecuencia natural

N_{max} =velocidad de giro

Fuerzas externas que actúan sobre el sistema

Las fuerzas o cargas externas que sufre un árbol de transmisión con sección hueca, sometido al torque aplicado y considerando la fuerza centrífuga (véase figura 7), resultan como se describe en las ecuaciones 31, 32 y 33.



$$N_x = 0 \quad (31)$$

$$N_y = 2t\rho r^2\omega^2 \quad (32)$$

$$N_{xy} = \frac{T}{2\pi r} \quad (33)$$



Figura 7. Fuerzas externas que actúan sobre el árbol de transmisión.

Donde:

ρ = densidad del material

ω = velocidad angular

t =espesor de la pieza

r =radio de la sección

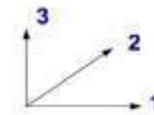
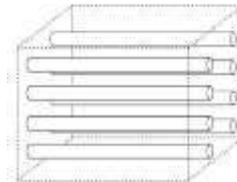
T =torque aplicado

N_x =carga axial

Se propone el material mostrado en la tabla 1 para realizar el diseño del árbol, es un compuesto de fibra de carbono con resina epoxica, el espesor de cada lamido es de 0.125 mm y sus características mecánicas se muestran a continuación.

Tabla 1. Material propuesto para el diseño del árbol de transmisión.

Concepto	Unidad	Carbono/Eposi (USN150)	
Módulo de elasticidad en dirección 1	E_1	GPa	131,6
Módulo de elasticidad en dirección 2 y 3	E_2, E_3	GPa	8,20
Módulo de cortante en plano 23	G_{23}	GPa	3,5
Módulo de cortante en plano 13 y 12	G_{13}, G_{12}	GPa	4,5
Coef. de Poisson en plano 12 y 13	ν_{12}, ν_{13}	---	0,282
Coef. de dilatación térmica en dirección 1	α_1	$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	-0,9
Coef. de dilatación térmica en dirección 2	α_2	$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	27
Coef. de expansión higroscópico en dirección 1	β_1	---	0
Coef. de expansión higroscópico en dirección 2	β_2	---	0,4
Resistencia a la tracción en dirección 1	S_1^t	MPa	2000
Resistencia a la compresión en dirección 1	S_1^c	MPa	1400
Resistencia a la tracción en dirección 2 y 3	$S_{2,3}^t$	MPa	61
Resistencia a la compresión en dirección 2 y 3	$S_{2,3}^c$	MPa	130
Resistencia al cortante en plano 23	S_{23}	MPa	40
Resistencia al cortante en plano 13 y 12	S_{13}, S_{12}	MPa	70
Densidad	ρ	kg/m ³	1550
Espesor de la lámina	t_{lamina}	mm	0,125



Los datos de entrada al algoritmo PSO se muestran en la tabla 2, en donde se consideran los parámetros de fabricación de la pieza, del algoritmo, geométricos y cargas externas.



Tabla 2. Datos de entrada al algoritmo PSO.

Datos de entrada a la metaheurística:		
Velocidad máxima de giro	9000 rpm	<i>Cargas externas y Parámetros geométricos</i>
Par máximo transmitido	3500 Nm	
Diámetro exterior	0.1 m	
Longitud del árbol	1.5 m	
Temperatura de curado	120 °C	<i>Parámetros de fabricación de la pieza</i>
Temperatura de servicio	20 °C	
Contenido de humedad	0.5 %	
Coefficiente de seguridad	2.5	
Tamaño de población	50	<i>Parámetros del algoritmo</i>
Número máximo de iteraciones	70	

Consideraciones basadas en la literatura para obtener el número óptimo de láminas mediante el uso del algoritmo PSO [4]:

- 10-32 (experimentalmente se determina que por debajo de 10 láminas es imposible tener un diseño factible, mientras que con 32 se puede garantizar la existencia de del diseño factible).
- N =tamaño de la población, para PSO normalmente es entre 40 y 100.
- w = factor de inercia, típicamente 0.5.
- c_1 y c_2 =factores de aprendizaje, normalmente se toma 2.
- r_1 y r_2 =son números aleatorios entre 0 y 1.

Resultados y discusión

Estos resultados son valores promedio de haber realizado múltiples corridas del algoritmo y de una selección de muestras de estudio de 30 corridas, las cuales convergieron a la solución. La tabla 3 muestra un resumen de los parámetros de diseño obtenidos por el algoritmo para un árbol de transmisión hecho de fibra de carbono/epoxi USN150, mientras que en la figura 8 se observa la evolución de la búsqueda, mencionando que a cada iteración se aumenta una lámina para realizar una búsqueda exhaustiva, y de las soluciones factibles, tomar la de menor valor de función objetivo.

Cabe aclarar, que la nomenclatura de la orientación de las fibras o secuencia de apilamiento es simétrica, es decir la s al final del corchete significa que es la primera parte de los laminados respecto al eje medio y que la siguiente mitad tendrá las mismas orientaciones de forma simétrica. En la tabla de resultados se puede observar, que mediante el algoritmo PSO se ha obtenido un diseño óptimo que tiene 24 láminas y un peso de 2.125 kg, para todas las corridas que convergen al óptimo global, sin embargo, las secuencias de apilamiento cambian, esto es razonable ya que se trata de un algoritmo que crea soluciones aleatorias y las va mejorando a cada iteración, además de que existen más de una combinación posible que lleva a obtener el objetivo buscado, que para este caso fueron dos secuencias de apilamiento distintas, también se obtiene el menor peso del material para soportar las cargas a las que estará sometida la pieza, por lo que se puede establecer que estas



dos secuencias de apilamiento son factibles, siempre y cuando converjan a la mínima masa y al número de láminas óptimo.



Figura 8. Variación de la masa del árbol de transmisión respecto al número de iteración.

Tabla 3. Resultados del algoritmo PSO para el diseño de un árbol de transmisión hecho de fibra de carbono/epoxi.

I	do (mm)	L (mm)	tk (mm)	n	t (mm)	Secuencia óptima	Tmax (Nm)	Nmax (rpm)	m (kg)	T curado (°C)	T servicio (°C)	% humedad	CS
1	100	1500	0.125	24	3	[45/-45/0/0/45/-45/0/45/-45/0/45]	3500	9000	2.125512	120	20	0.5	2.5
2	100	1500	0.125	24	3	[0/0/45/-45/0/0/45/-45/45/-45/0/45]	3500	9000	2.125523	120	20	0.5	2.5
3	100	1500	0.125	24	3	[45/-45/0/0/45/-45/0/45/-45/0/45]	3500	9000	2.125523	120	20	0.5	2.5
4	100	1500	0.125	24	3	[0/0/45/-45/0/0/45/-45/45/-45/0/45]	3500	9000	2.125523	120	20	0.5	2.5
5	100	1500	0.125	24	3	[45/-45/0/0/45/-45/0/45/-45/0/45]	3500	9000	2.125523	120	20	0.5	2.5
6	100	1500	0.125	24	3	[45/-45/0/0/45/-45/0/45/-45/0/45]	3500	9000	2.125523	120	20	0.5	2.5
7	100	1500	0.125	24	3	[0/0/45/-45/0/0/45/-45/45/-45/0/45]	3500	9000	2.125523	120	20	0.5	2.5
8	100	1500	0.125	24	3	[0/0/45/-45/0/0/45/-45/45/-45/0/45]	3500	9000	2.125523	120	20	0.5	2.5
9	100	1500	0.125	24	3	[0/0/45/-45/0/0/45/-45/45/-45/0/45]	3500	9000	2.125523	120	20	0.5	2.5
10	100	1500	0.125	24	3	[0/0/45/-45/0/0/45/-45/45/-45/0/45]	3500	9000	2.125523	120	20	0.5	2.5
11	100	1500	0.125	24	3	[45/-45/0/0/45/-45/0/45/-45/0/45]	3500	9000	2.125523	120	20	0.5	2.5
12	100	1500	0.125	24	3	[0/0/45/-45/0/0/45/-45/45/-45/0/45]	3500	9000	2.125523	120	20	0.5	2.5
13	100	1500	0.125	24	3	[0/0/45/-45/0/0/45/-45/45/-45/0/45]	3500	9000	2.125523	120	20	0.5	2.5
14	100	1500	0.125	24	3	[45/-45/0/0/45/-45/0/45/-45/0/45]	3500	9000	2.125523	120	20	0.5	2.5

Conclusiones

Se ha logrado implementar un algoritmo que es capaz de optimizar la secuencia de apilamiento y el número de láminas de fibra de carbono/epoxi para el diseño de un árbol de transmisión, el cual



estará sometido a cargas específicas en su funcionamiento, de esta manera, el diseñador podrá ahorrar tiempo en el proceso de diseño cuando requiera de un análisis de este tipo de elementos, variando dentro del código del algoritmo los parámetros necesarios como, la longitud árbol de transmisión, la velocidad de servicio, el diámetro exterior, la temperatura de curado, la humedad del material, así como las características de otro material propuesto. Para este caso a diferencia de trabajos previos, se restringieron los ángulos de apilamiento que se pueden generar a 0° , $\pm 45^\circ$ y 90° , debido a que en la práctica estos son los ángulos que con los que se pueden fabricar las piezas diseñadas. Se puede establecer que la implementación de metaheurísticas en el diseño mediante materiales compuestos es de gran utilidad y con resultados favorables, debido a la complejidad de este tipo de diseños y al gran número de posibles soluciones existentes.

Referencias

- [1] S. Suresh, P. B. Sujit y A. K. Rao, «Particle swarm optimization approach for multi-objective composite box-beam desing,» *Composite Structures* 81, pp. 598-605, 2007.
- [2] V. Vázquez Castillo, D. Hernández Lara , E. A. Merchán Cruz, R. G. Rodríguez Cañizo y E. A. Portilla Flores, «Implementación de algortimos genéticos para el diseño, optimización y selección de vigas,» *CORE 2017*, 2017.
- [3] F. Reguera y V. H. Cortínez, «Diseño óptimo de vigas de pared delgada PRF sometidas a cargas dinámicas,» *Mecánica computacional. Vol. XXXII*, pp. 3575-3595, 2013.
- [4] W. Shengyu, *Uso de materiales compuestos en el diseño de un árbol de transmisión*, España: Universidad Carlos III de Madrid, 2014.
- [5] T. Rangaswamy y S. Vijayrangan, «Optimal sizing and stacking sequence of composite drive shafts,» *Materials science, Vol. 11 No. 2*, p. India, 2005.
- [6] C. Navarro, *Elasticidad y resistencia de materiales II*, España, 2014.
- [7] A. C. L. y J. L. Montaña, *Algoritmos bioinspirados: la evolución biológica en la computación.*, Cantabria: Departamento de Matemáticas, Estadística y Computación, Universidad de Cantabria, 2011.
- [8] J. Kennedy y R. C. Eberhart, *Intelligent Swarm Systems*, New York, USA: Academic Press, 2000.

Agradecimientos. Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional, a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Azcapotzalco, al Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado.



Modelo Cinemático Acoplado de un Manipulador Móvil

Coupled Kinematic Model for a Mobile Manipulator

Vladimir Prada-Jiménez¹, Paola Andrea Niño-Suárez^{2, γ} y Edgar Alfredo Portilla-Flores³

1. Ingeniería Electrónica, Universidad Central, Bogotá, Colombia.
2. Instituto Politécnico Nacional, ESIME Azcapotzalco, Cd. México, México.
3. Instituto Politécnico Nacional, CIDETEC, Cd. México, México.

γ. Autor correspondiente: pninos@ipn.mx

Resumen

En la actualidad existe un gran interés científico y tecnológico en el desarrollo de manipuladores móviles. Lo anterior, se puede evidenciar no solo en las numerosas publicaciones científicas sino en las investigaciones para desarrollar tecnologías aplicadas en este campo. Algunos de los retos que han despertado gran interés es el obtener un modelo cinemático acoplado del manipulador-móvil, con el fin de controlar eficientemente sus movimientos. Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo es contribuir al conocimiento presentando la aplicación de una metodología para obtener el modelo cinemático acoplado de un manipulador móvil conformado por un brazo antropomórfico de 3 grados de libertad y una plataforma móvil tipo (2,0) de locomoción diferencial.

Palabras clave: Acople, Cinemática, Manipulador, Móvil, Robótica.

Abstract

At present there is a great scientific and technological interest in the development of mobile manipulators. The foregoing can be evidenced not only in the numerous scientific publications but also in research to develop applied technologies in this field. Some of the challenges that have aroused great interest is to obtain a coupled kinematic model of the mobile manipulator, in order to efficiently control its movements. Therefore, the main objective of this work is to contribute to the knowledge of the application of a methodology to obtain the kinematic model coupled to a mobile manipulator below an anthropomorphic angle of 3 degrees of freedom and a mobile platform type (2) of differential locomotion.

Keywords: Coupled, Kinematics, Manipulator, Mobile, Robotics.

Introducción

Los manipuladores robóticos suelen estar instalados a una base fija y con un volumen de trabajo limitado. Sin embargo, debido a la diversidad de tareas que surgen en la actualidad es necesario ampliar los espacios de trabajo, por ello es común adicionarles cintas transportadoras, dispositivos de transporte y en algunos casos optar por usar Manipuladores Móviles (MM). Los MM tienen muchas aplicaciones potenciales debido a sus capacidades, algunas de ellas están presentes en procesos de fabricación, ensamble, construcción, neutralización de explosivos, mantenimiento de reactores nucleares y exploración en planetas [1].

A diferencia de los robots móviles, un MM consiste en uno o varios manipuladores ensamblados en la parte superior de una plataforma móvil o un robot móvil [2]. Un MM tiene un espacio de trabajo considerablemente más grande que un manipulador fijo y una mayor manipulación que los



robots móviles. Este tipo de robot combina la capacidad de manipulación diestra ofrecida por los manipuladores de base fija y la movilidad que ofrecen las plataformas móviles. Al poder realizar ambas tareas simultáneamente, el MM tiene ventajas sobre los manipuladores estacionarios, tales como un mayor espacio de trabajo y mayor autonomía al ser inalámbrico, sin embargo presenta algunas desventajas como una alta demanda de energía lo que con lleva al rápido consumo de las baterías; la complejidad en el modelado debido a restricciones no holónomas y la necesidad de acoplar sus modelos (móvil-manipulador) tanto cinemáticos como dinámicos [3]–[5]. En el presente trabajo se presenta el procedimiento para obtener el modelo cinemático acoplado del MM partiendo de la cinemática del móvil y del manipulador por separado, a su vez se presentan los resultados de los modelos cinemáticos separados y los de operación del robot con la cinemática acoplada.

En general los robots MM pueden realizar diferentes tipos de tareas, de las que se resaltan la locomoción y la manipulación; en la actualidad se obtienen modelos cinemáticos y dinámicos de la base y del brazo manipulador por separado y posteriormente se acoplan matemáticamente [6]–[8]. Una razón de emplear este enfoque es darle versatilidad al modelado y que le permita al diseñador escoger la configuración que más le convenga, de acuerdo con sus necesidades. Un ejemplo de las posibles configuraciones que se tienen es la locomoción con ruedas o con patas y en la manipulación con brazos de cinemática abierta o cerrada, haciendo necesario determinar el tipo de articulación y el número de grados de libertad. Un trabajo fundamental para el modelado de robots móviles y del cual se basan otros autores se presenta en [4], donde se proponen cuatro tipos de configuraciones para robots móviles con ruedas y se determina su modelo matemático. Un esquema de modelado cinemático de manipuladores móviles se presenta en [9] y en [10], donde se determina de manera independiente el modelo cinemático de la plataforma móvil y del brazo. En [6] se presenta un método para combinar el modelo cinemático de la base móvil con el del manipulador estacionario, pero se modela el móvil y el brazo por métodos por distintos métodos. En general, se usa como herramienta principal la metodología de Euler–Lagrange e incorporan las restricciones no holónomas por medio de multiplicadores de Lagrange [11]; sin embargo, se depende del modelo cinemático para incorporar las restricciones no holónomas.

Debido a la utilidad de los manipuladores móviles, es importante obtener modelos cinemáticos y dinámicos que permitan un rápido y fácil análisis del manipulador. También es importante disponer de herramientas que construyan sobre el conocimiento ya existente y no tener que usar dos metodologías distintas para el modelado de cada parte del MM. Recientemente se han publicado trabajos que describen metodologías para el modelado cinemático y dinámico acoplado [3], [6], [7], [12]–[17]. Se encontró que la mayoría de los autores que proponen metodologías para el acople dinámico de manipuladores móviles se basan en [18], trabajo publicado en 1992. Por lo anterior, se hace evidente que existe un interés por la comunidad científica por el tema, dándole aún más relevancia al presente artículo.

El presente artículo se encuentra organizado de la siguiente forma, la sección 2 presenta la configuración del MM a modelar, en la sección 3 se obtiene el modelado cinemático para el robot móvil tipo diferencial y para el manipulador tipo antropomórfico por separado y en la sección 4 se desarrolla el modelado cinemático acoplado del MM. En la sección 5 se observa la implementación y los resultados. Por último, se presentan las conclusiones y las referencias bibliográficas usadas.



Diseño conceptual del MM

El robot concebido es del tipo antropomórfico y cuenta con tres eslabones y tres grados de libertad. Cada uno de los grados de libertad es una articulación del tipo rotacional. La columna tiene la finalidad de darle una distancia en Z al brazo y un mayor volumen de trabajo. Para el diseño conceptual de la plataforma móvil se escogió un robot tipo (2,0) [4], el cual tiene versatilidad de movimiento, facilidad en el modelado y simplicidad para su control. Este robot consta de dos ruedas fijas y la movilidad se logra al tener una velocidad diferente en cada rueda, a esto se le llama locomoción diferencial. El robot seleccionado tiene una tercera rueda pasiva con el fin de dar estabilidad y servir como punto de apoyo. El diseño conceptual del MM se presenta en la Figura 1. En este se resalta que el sistema de referencia del móvil O_m , con respecto al sistema de referencia de la base del manipulador O_b está desplazado una distancia d , lo cual incide en la cinemática del robot móvil.

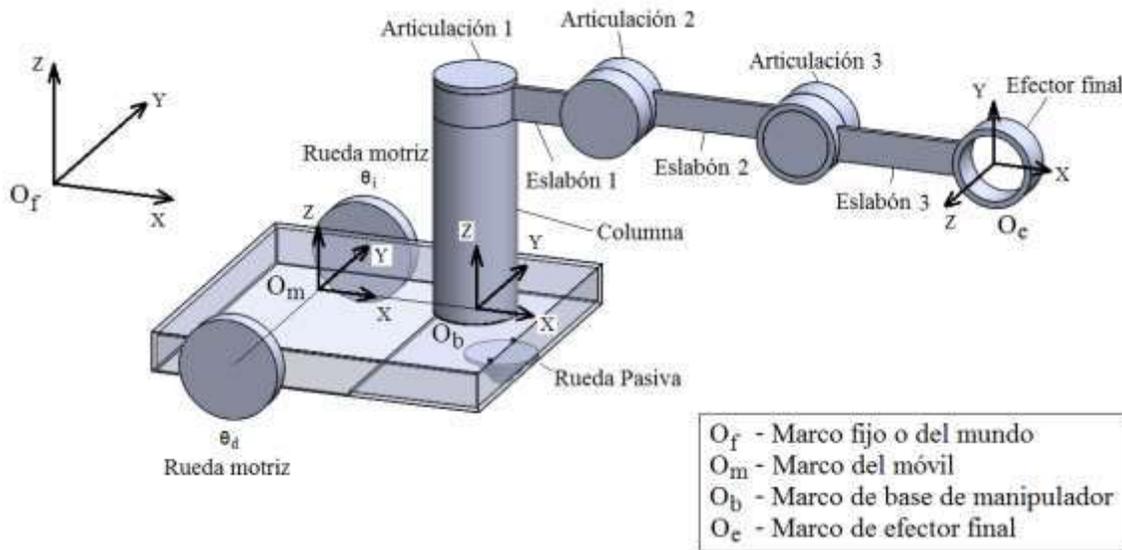


Figura 1. Diseño conceptual del MM impulsado por sistema diferencial.

Cinemática

En esta sección, se realiza el modelado cinemático directo e inverso del robot móvil y el manipulador por separado. Posteriormente, se presenta el modelo cinemático acoplado del MM. Dado que el procedimiento para obtener el modelo cinemático del robot móvil y el MM son similares, se utiliza una representación simbólica común. Para facilidad en el manejo de las ecuaciones se usa la siguiente notación: $s_m = \sin \theta_m$, $c_m = \cos \theta_m$, $s_1 = \sin \theta_1$, $c_1 = \cos \theta_1$, $s_2 = \sin \theta_2$, $c_2 = \cos \theta_2$, $s_3 = \sin \theta_3$, $c_3 = \cos \theta_3$, $s_{m1} = \sin(\theta_m + \theta_1)$, $c_{m1} = \cos(\theta_m + \theta_1)$, $s_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3)$ and $c_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$. En cada caso se presentan los resultados de las simulaciones que corroboran los modelos obtenidos.

Cinemática directa del robot móvil tipo diferencial

La plataforma móvil es impulsada por un sistema diferencial como el que se presenta en la Figura 2.a. La cinemática de la plataforma móvil se determina hasta el sistema de referencia O_b , debido a que allí está instalado el manipulador.

El cálculo de las velocidades en X y Y del punto O_b se presenta en las ecuaciones (1) y (2).



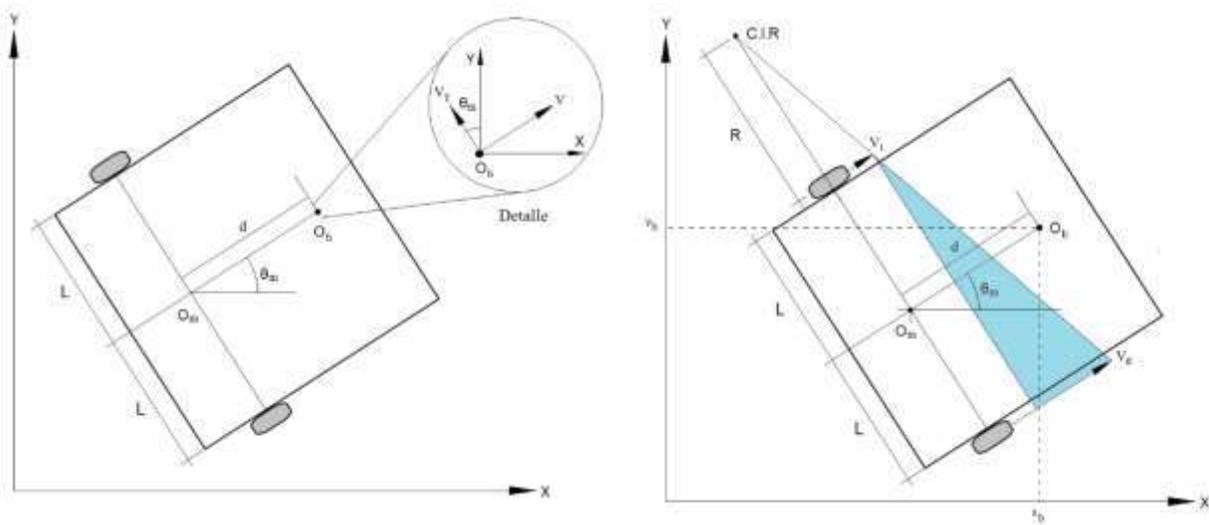
$$\dot{x}_b = v c_m - v_T s_m \quad (1)$$

$$\dot{y}_b = v s_m + v_T c_m \quad (2)$$

Donde v_T es la velocidad tangencial en ese punto debido a la velocidad angular $w = \dot{\theta}_m$. Las ecuaciones (1) y (2) se pueden expresar en términos de w por medio de la relación $v_T = wd$ y en forma matricial como se presenta en la ecuación (3).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{y}_b \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_m & -ds_m \\ s_m & dc_m \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \quad (3)$$

En la Figura 2.b, se puede observar que la velocidad lineal de cada rueda v_d y v_i son perpendiculares al eje de giro, por lo que la velocidad $\dot{\theta}_m$ es producida por la composición de las velocidades lineales de cada una de las ruedas y la velocidad lineal en el centro de masa $v_{cm} = v$ será igualmente perpendicular a los ejes de rodadura de las ruedas.



a. Velocidades del robot en O_b

b. Velocidades del robot respecto al CIR

Figura 1. Velocidades del robot

Si se tiene en cuenta que el Centro Instantáneo de Rotación (CIR) es el centro de rotación de toda la masa del móvil, la velocidad lineal del móvil será el producto de la velocidad angular del móvil $\dot{\theta}_m$ y la posición de O_m respecto al CIR, como se presenta en la ecuación (4).

$$v = \dot{\theta}_m(R + L) \quad (4)$$

Por lo tanto, la velocidad de cada rueda se calcula por medio de las ecuaciones (5) y (6).

$$v_i = \dot{\theta}_m R \quad (5)$$

$$v_d = \dot{\theta}_m(R + 2L) \quad (6)$$



De la Figura 2.b, se puede deducir la ecuación (7) por medio de la semejanza entre triángulos, la cual relaciona las velocidades lineales de cada rueda respecto al punto O_m .

$$\frac{v - v_i}{v_d - v_i} = \frac{L}{2L}$$
$$2(v - v_i) = v_d - v_i$$
$$v = \frac{v_d + v_i}{2} \quad (7)$$

Igualmente, por medio de la Figura 2.b, se puede observar la relación que existe entre la velocidad de cada rueda cuando se produce un giro. De esta forma, el resultado es la diferencia de velocidades de las ruedas con respecto al ancho de la plataforma $2L$, que se presenta en la ecuación (8).

$$\dot{\theta}_m = \frac{v_d - v_i}{2L} \quad (8)$$

Expresando las ecuaciones (7) y (8) en términos de $\dot{\theta}_d$ y $\dot{\theta}_i$ se tienen las ecuaciones (9) y (10), por medio de las expresiones $v_d = r\dot{\theta}_d$ y $v_i = r\dot{\theta}_i$ donde r es el radio de la rueda.

$$v = \frac{r(\dot{\theta}_d + \dot{\theta}_i)}{2} \quad (9)$$

$$\dot{\theta}_m = \frac{r(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}_i)}{2L} \quad (10)$$

en forma matricial, se presenta en la ecuación (11).

$$\begin{bmatrix} v \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ \frac{r}{2L} & -\frac{r}{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_d \\ \dot{\theta}_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

Finalmente, se realiza el producto de las matrices (3) y (11) y el resultado se presenta en la ecuación (12). Se aclara que esta ecuación en realidad representa el Jacobiano de velocidades del robot y que para obtener la cinemática o el vector $[x_b \ y_b \ \theta_m]^T$ es necesario realizar la integral de cada una de las variables.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{y}_b \\ \dot{\theta}_m \\ \dot{\theta}_d \\ \dot{\theta}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2L}(Lc_m - ds_m) & \frac{r}{2L}(Lc_m + ds_m) \\ \frac{r}{2L}(Ls_m + dc_m) & \frac{r}{2L}(Ls_m - dc_m) \\ \frac{r}{2L} & -\frac{r}{2L} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_d \\ \dot{\theta}_i \end{bmatrix} \quad (12)$$



En la Figura 3 se presenta el modelo cinemático directo del robot móvil 2.0 implementado en el software Simulink de Matlab ®.

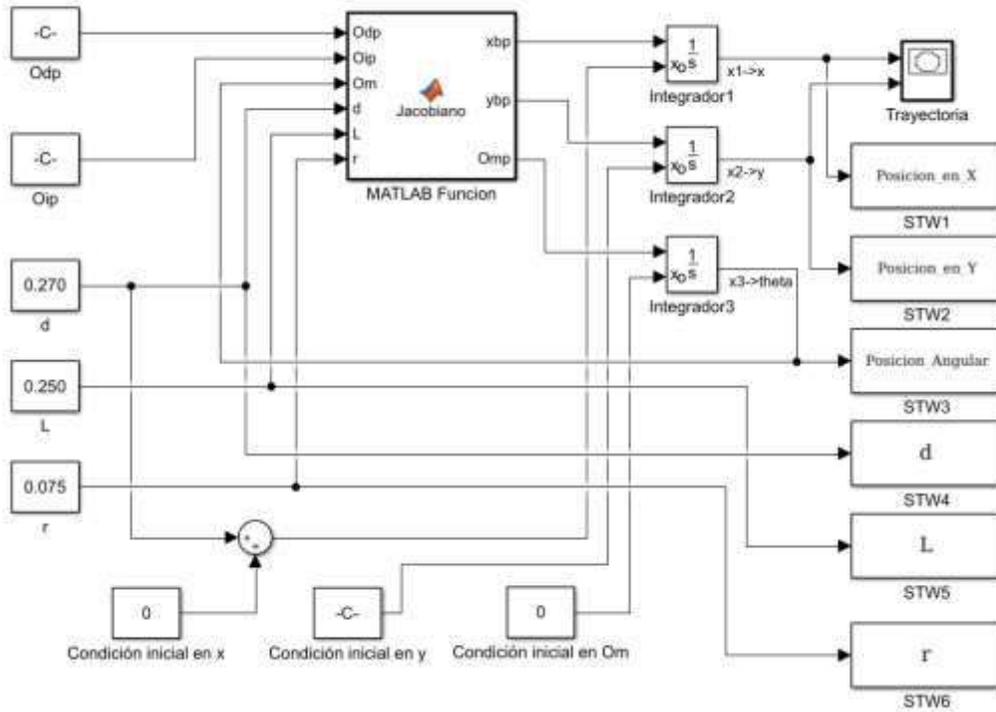
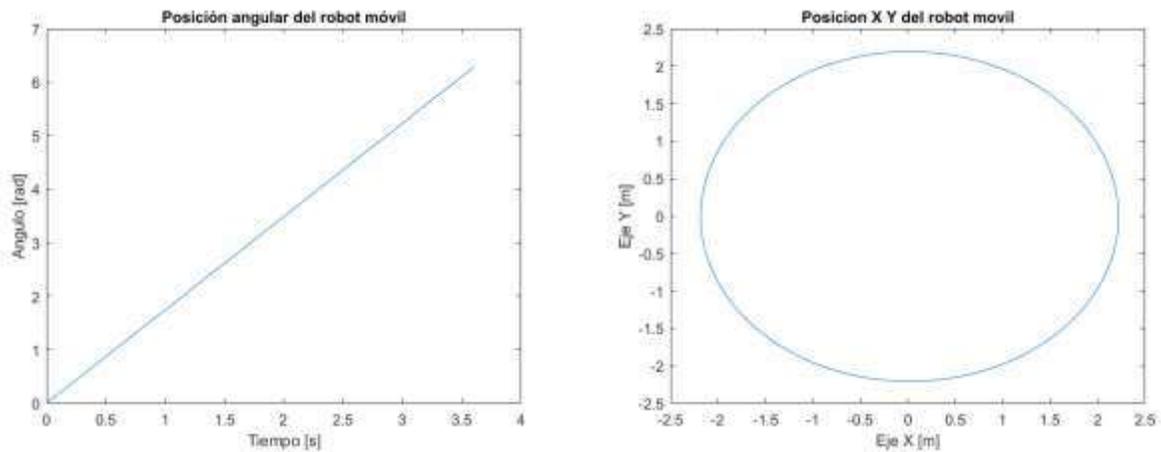


Figura 2. Modelo en Simulink de la cinemática directa del robot móvil.

Los resultados de la simulación se presentan en la Figura 4, en donde la Figura 4.a es la posición angular del móvil o θ_m a través del tiempo de simulación y la Figura 4.b es la trayectoria en el plano $X - Y$ del robot móvil al realizar una trayectoria circular de radio $R=2.19$ m. De esta forma se verifica mediante los resultados que la cinemática del robot móvil y las restricciones no-holonómicas son correctas.



a. Posición angular θ_m del robot móvil

b. Posición en $X - Y$ del robot móvil

Figura 3. Posición angular θ_m y trayectoria en el plano $X - Y$ del robot móvil



Cinemática directa del manipulador de 3 GDL

Para el robot antropomórfico de 3 GDL los sistemas de coordenadas se asignan de la siguiente manera:

- La orientación del sistema de coordenadas 0 es arbitraria, por lo que \hat{X}_0 se hace coincidir con \hat{X}_1 el cual está orientado a lo largo del eslabón que une la articulación 1 y 2 de tal forma que la variable de articulación rotacional $\theta_1 = 0$.
- El origen del sistema coordenado 1 se ubica de manera que $d_1 = L_0$.
- Para el sistema coordenado 2, \hat{X}_2 se alinean con \hat{X}_1 y se hace el cambio de orientación de \hat{Z}_2 para que quede apuntando en el mismo sentido del eje de rotación de la articulación 2.
- Para sistema coordenado 3, \hat{X}_3 se alinea con \hat{X}_2 . Los ejes \hat{Z} se orientan paralelos a los ejes de rotación de cada articulación y la orientación de los ejes \hat{Y} se determinan por la regla de la mano derecha.

Lo anterior se ve representado en la Figura 5.

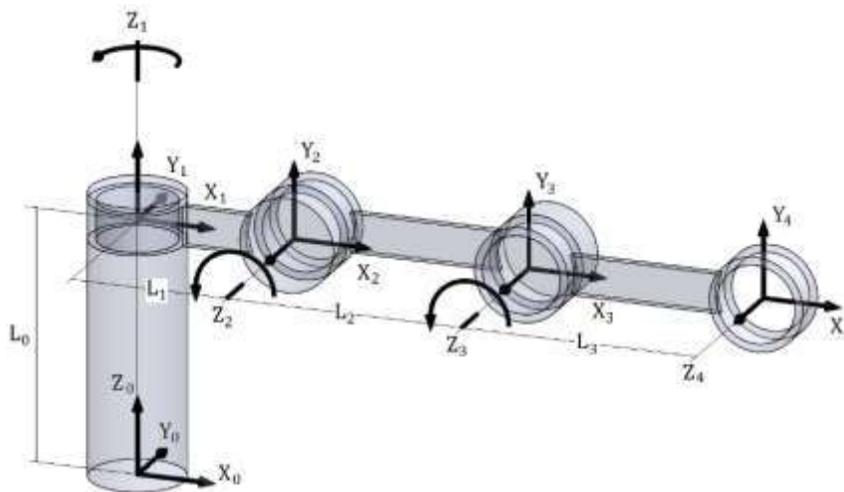


Figura 4. Asignación de los sistemas de coordenadas al manipulador de 3 GDL

Los parámetros de Denavit-Hartenberg (DH) se presentan en la Tabla 1, la cual describe las principales características del robot, como son los ángulos de rotación (θ_i , α_i), las longitudes de los brazos (a_i) y las distancias entre articulaciones (d_i).

Tabla 1. Parámetros de Denavit-Hartenberg para el robot de 3 GDL

Vínculo	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	$d_1 = L_0$	θ_1
2	$a_1 = L_1$	$\alpha_1 = \pi/2$	0	θ_2
3	$a_2 = L_2$	0	0	θ_3
4	$a_3 = L_3$	0	0	0

Para el robot RRR es necesario conocer la posición y orientación del último sistema coordenado por medio de la matriz de transformación 0_4T o la multiplicación de las matrices 0_1T , 1_2T , 2_3T y 3_4T .



Estas se presentan en las ecuaciones (13), (14), (15) y (16).

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & L_2 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

La matriz de transformación 0T_4 o que según los sistemas de referencia establecidos en la Figura 1 sería b_eT , se presenta en la ecuación (17):

$${}^b_eT = {}^0T_4 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4$$
$${}^b_eT = {}^0T_4 = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & t_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

donde:

$$\begin{aligned} t_{11} &= c_1 c_2 c_3 - c_1 s_2 s_3 \\ t_{12} &= -c_1 c_2 s_3 - c_1 s_2 c_3 \\ t_{13} &= s_1 \\ t_{14} &= c_1 L_1 + c_1 c_2 L_2 + c_1 c_2 c_3 L_3 - c_1 s_2 s_3 L_3 \\ t_{21} &= s_1 c_2 c_3 - s_1 s_2 s_3 \\ t_{22} &= -s_1 c_2 s_3 - s_1 s_2 c_3 \\ t_{23} &= -c_1 \\ t_{24} &= s_1 L_1 + s_1 c_2 L_2 - s_1 s_2 s_3 L_3 + s_1 c_2 c_3 L_3 \\ t_{31} &= c_2 s_3 + s_2 c_3 \\ t_{32} &= c_2 c_3 - s_2 s_3 \\ t_{33} &= 0 \\ t_{34} &= L_0 + s_2 L_2 + c_2 s_3 L_3 + s_2 c_3 L_3 \end{aligned}$$



Por medio del vector de posición de la matriz de transformación se puede determinar el espacio de trabajo del robot, ya que este provee la posición en X , Y y Z del efector final a partir de las posiciones angulares θ_1 , θ_2 y θ_3 .

$$t_{14} = P_x = c_1(L_1 + c_2L_2 + c_{23}L_3) \quad (18)$$

$$t_{24} = P_y = s_1(L_1 + c_2L_2 + c_{23}L_3) \quad (19)$$

$$t_{34} = P_z = L_0 + s_2L_2 + s_{23}L_3 \quad (20)$$

Para validar el modelo de la cinemática directa, se implementa un algoritmo con las ecuaciones (18), (19) y (20) realizando variaciones en los ángulos θ . El resultado de la simulación se presenta en la Figura 6 y se puede observar que el robot realiza paulatinamente las rotaciones por separado de cada articulación, logrando el movimiento y las posiciones esperadas en el efector final.

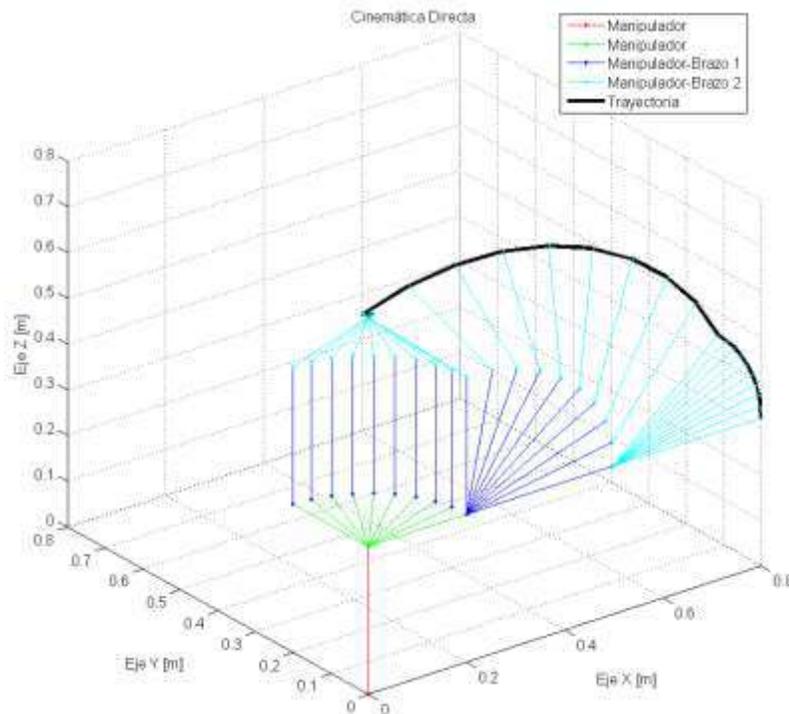


Figura 5. Prueba de la cinemática del manipulador de 3 GDL

Cinemática directa acoplada del MM

Para el MM, se desea obtener la matriz de transformación f_eT que expresa la posición/orientación del efector final con respecto al sistema de coordenadas fijo o del mundo O_f y la cual se determina por medio de la ecuación (21).

$${}^f_eT = {}^f_bT {}^b_eT \quad (21)$$

donde f_bT expresa la posición/orientación de la base del manipulador O_b con respecto al sistema de coordenadas del mundo O_f y b_eT expresa la posición/orientación del efector final con respecto al



sistema de coordenadas de la base del manipulador O_b . La matriz f_bT es el resultado de multiplicar 3 matrices de transformación, dos de ellas involucran el desplazamiento del sistema coordinado O_b , siendo T_{x,x_b} la que expresa el desplazamiento en X , T_{y,y_b} la que expresa el desplazamiento en Y y la tercer matriz T_{z,θ_m} la que expresa la orientación con respecto al eje X debido a la rotación del móvil alrededor del eje Z , cómo se presenta en las ecuaciones (22), (23) y (24). Los valores de x_b , y_b , θ_m provienen de integrar los valores \dot{x}_b , \dot{y}_b , $\dot{\theta}_m$ de la cinemática del robot móvil, en la ecuación (12). La matriz b_eT es la utilizada en la ecuación (17).

$$T_{x,x_b} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_b \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$T_{y,y_b} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y_b \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$T_{z,\theta_m} = \begin{bmatrix} c_m & -s_m & 0 & 0 \\ s_m & c_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

La matriz de transformación ${}^f_bT = T_{x,x_b}T_{y,y_b}T_{z,\theta_m}$ se presenta en la ecuación (25).

$${}^f_bT = \begin{bmatrix} c_m & -s_m & 0 & x_b \\ s_m & c_m & 0 & y_b \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Se realiza el producto de las matrices ${}^f_bT {}^b_eT$ para obtener la matriz f_eT que tiene la posición/orientación del sistema de referencia O_e con respecto al sistema de referencia O_f , el resultado se presenta en la ecuación (26).

$${}^f_eT = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$p_{11} = s_m(s_1s_2s_3 - s_1c_2c_3) - c_m(c_1s_2s_3 - c_1c_2c_3)$$

$$p_{12} = s_m(s_1c_2s_3 + s_1s_2c_3) - c_m(c_1c_2s_3 + c_1s_2c_3)$$

$$p_{13} = c_ms_1 + s_mc_1$$

$$p_{14} = x_b + c_m(c_1L_1 - L_3(c_1s_2s_3 - c_1c_2c_3) + c_1c_2L_2) - s_m(s_1L_1 - L_3(s_1s_2s_3 - s_1c_2c_3) + s_1c_2L_2)$$

$$p_{21} = -s_m(c_1s_2s_3 - c_1c_2c_3) - c_m(s_1s_2s_3 - s_1c_2c_3)$$

$$p_{22} = -s_m(c_1c_2s_3 + c_1s_2c_3) - c_m(s_1c_2s_3 + s_1s_2c_3)$$

$$p_{23} = s_ms_1 - c_mc_1$$

$$p_{24} = y_b + s_m(c_1L_1 - L_3(c_1s_2s_3 - c_1c_2c_3) + c_1c_2L_2) - c_m(s_1L_1 - L_3(s_1s_2s_3 - s_1c_2c_3) + s_1c_2L_2)$$

$$p_{31} = c_2s_3 + s_2c_3$$

$$p_{32} = c_2c_3 - s_2s_3$$

$$p_{33} = 0$$

$$p_{34} = r + L_0 + s_2L_2 + L_3(c_2s_3 + s_2c_3)$$



Resultados

Se realiza la validación de este modelo por medio de una simulación, en la cual el móvil y el manipulador realizan movimientos simultáneamente. La plataforma móvil desarrolla una trayectoria circular y el manipulador desarrolla una trayectoria establecida con los parámetros de la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de simulación

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Tiempo de ejecución	t	3.6	s
Velocidad angular de la rueda derecha	$\dot{\theta}_d$	56.63	rad/s
Velocidad angular de la rueda izquierda	$\dot{\theta}_i$	45	rad/s
Condición inicial de la posición en X del móvil	x_m	-4.5	m
Condición inicial de la posición en Y del móvil	y_m	0	m
Condición inicial de la posición angular del móvil	θ_m	0	rad
Posición angular inicial y final de la articulación 1 del manipulador	θ_1	0 a $\pi/2$	rad
Posición angular inicial y final de la articulación 2 del manipulador	θ_2	$-\pi/2$ a $\pi/2$	rad
Posición angular inicial y final de la articulación 3 del manipulador	θ_3	$\pi/2$ a $-\pi/2$	rad

La trayectoria que desarrolla el robot se presenta en la Figura 7 y los perfiles de movimiento en la Figura 8, en estas figuras se puede observar que el modelo cinemático del MM está acoplado debido a que realiza el movimiento de forma simultánea (móvil-manipulador). La posición angular y la trayectoria en X - Y que realiza el móvil es la misma que se presenta en la Figura 4.

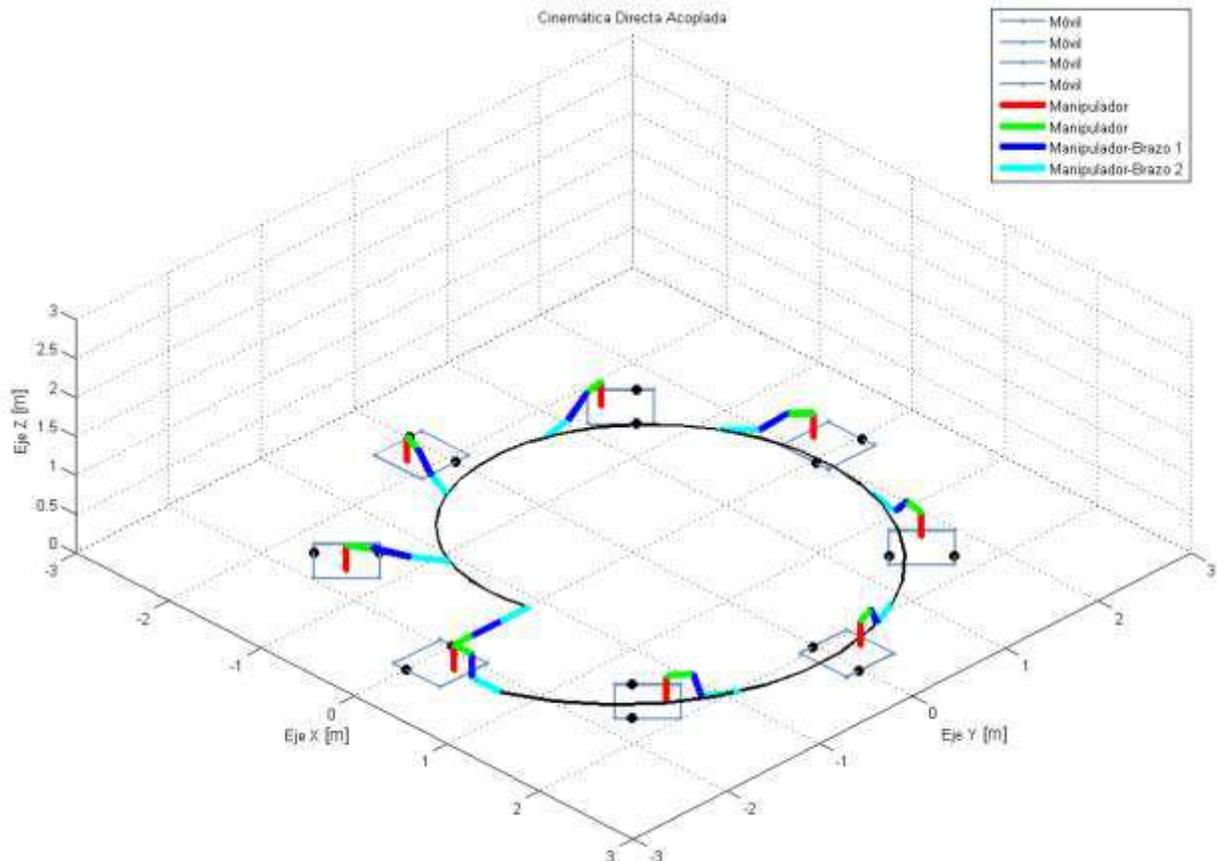
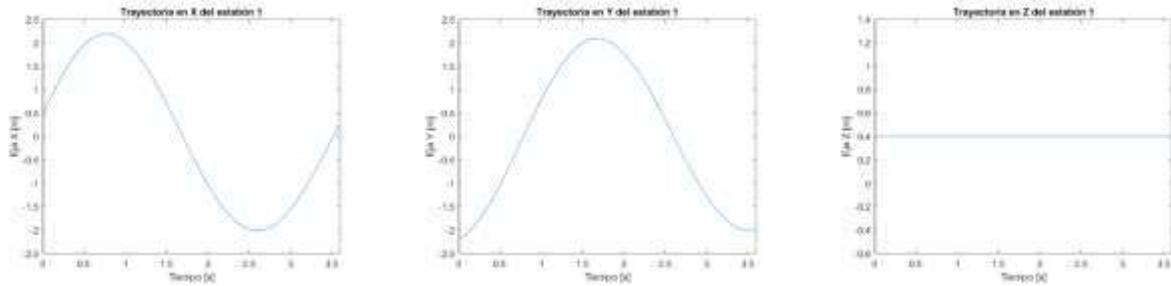
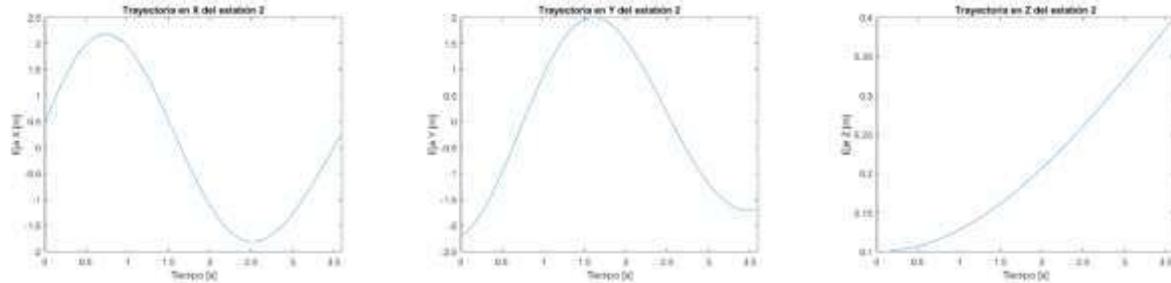


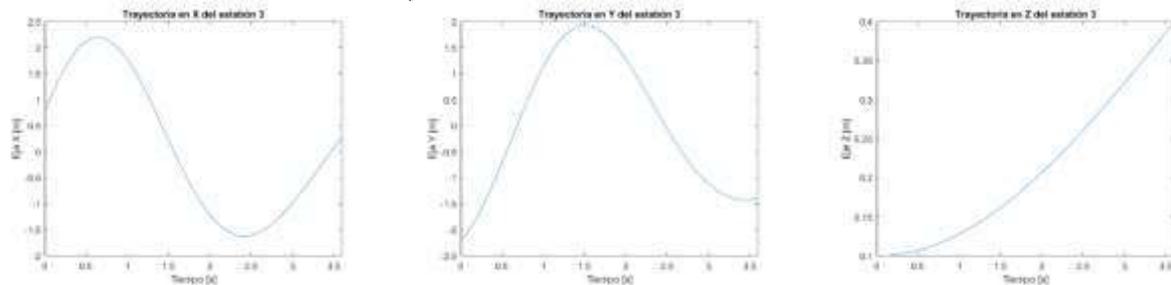
Figura 6. Trayectoria MM



Perfiles de movimiento del eslabón 1



Perfiles de movimiento del eslabón 2



Perfiles de movimiento del eslabón 3

Figura 7. Perfiles de movimiento de los eslabones

Conclusiones

El modelo cinemático acoplado presenta la interacción esperada en cada una de las articulaciones, es decir al realizarse un movimiento de alguna de las articulaciones las otras ven el efecto de dicho movimiento. Igualmente, se puede evidenciar en la matriz de transformación final del modelo cinemático acoplado, las cuales involucran términos de posición tanto del móvil como del manipulador.

La ventaja que presenta tener el modelo cinemático acoplado del MM radica en el que se pueden programar movimientos coordinados de la base con el manipulador y a su vez evitar posiciones inadecuadas que involucren volcamiento o choques con la misma estructura.

Como trabajo a futuro, se pretende desarrollar el modelo dinámico acoplado del MM con el fin de implementar una técnica de control y a su vez técnicas de optimización para garantizar el mínimo consumo de energía, para ello es necesario el modelo cinemático acoplado.

Referencias

- [1] A. K. Solutions, Robotics. Infinity Science Press, 2007.
- [2] A. Ollero, Robótica. Manipuladores y robots móviles. Marcombo, 2001.



- [3] P. M. Escobedo, “Manipulador móvil: Estudio sobre la coordinación de movimientos de un manipulador serial acoplado,” Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.
- [4] G. Campion, G. Bastin, and B. Dandrea-Novel, “Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots,” *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 12, no. 1, pp. 47–62, 1996.
- [5] Y. Yamamoto and X. Yun, “Coordinating locomotion and manipulation of a mobile manipulator,” *Gen. Robot. Act. Sens. Percept. Lab.*, no. December, pp. 2643–2648, 1992.
- [6] G. B. Chung, B.-J. Yi, D. J. Lim, and W. Kim, “An efficient dynamic modeling methodology for general type of hybrid robotic systems,” *IEEE Int. Conf. Robot. Autom. 2004. Proceedings. ICRA 2004*, vol. 2, pp. 1795–1802, 2004.
- [7] O. Ibrahim and W. Khalil, “Inverse and direct dynamic models of hybrid robots,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 45, no. 4, pp. 627–640, Apr. 2010.
- [8] P. Ben-Tzvi, A. A. Goldenberg, and J. W. Zu, “Design and Analysis of a Hybrid Mobile Robot Mechanism With Compounded Locomotion and Manipulation Capability,” *J. Mech. Des.*, vol. 130, no. 7, p. 072302, 2008.
- [9] Z. Li, W. Chen, and H. Liu, “Robust Control of Wheeled Mobile Manipulators Using Hybrid Joints,” *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 5, no. 1, pp. 83–90, 2008.
- [10] N. A. M. Hootsmans, “The motion control of manipulators on mobile vehicles,” Massachusetts Institute of Technology, 1992.
- [11] D. Naderi, A. Meghdari, and M. Durali, “Dynamic modeling and analysis of a two d.o.f. mobile manipulator,” *Robotica*, vol. 19, no. 2001, pp. 177–185, 2001.
- [12] G. H. Salazar Silva, M. A. Moreno Armendáriz, and J. Álvarez Gallegos, “Modelado y control de un manipulador móvil en el espacio de la tarea,” Instituto Politecnico Nacional, 2013.
- [13] H. G. Tanner and K. J. Kyriakopoulos, “Mobile manipulator modeling with Kane’s approach,” *Robotica*, vol. 19, no. 2001, pp. 675–690, 2001.
- [14] H. G. Tanner, K. J. Kyriakopoulos, and N. I. Krikelis, “Advanced agricultural robots: kinematics and dynamics of multiple mobile manipulators handling non-rigid material,” *Elsevier*, vol. 31, pp. 91–105, 2001.
- [15] J. I. Nantes, R. Carelli, I. De Automática, and U. Nacional, “Control coordinado de un manipulador móvil con evasión de obstáculos y máxima manipulabilidad,” in *V Jornadas Argentinas de Robótica*, 2008.
- [16] S. N. Mostafa, G. Mostafa, and M. Masoud, “Optimal Trajectory Planning of a Mobile Robot with Spatial Manipulator For Obstacle Avoidance,” *Int. Conf. Control. Autom. Syst.* 2010, pp. 314–318, 2010.
- [17] C. A. My and L. C. Thanh, “Inverse Dynamic of a N-links Manipulator Mounted on a Wheeled Mobile Robot,” *ICCAIS 2013*, pp. 164–170, 2013.
- [18] X. Yun and Y. Yamamoto, “Internal dynamics of a wheeled mobile robot,” *Proc. 1993 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst. (IROS '93)*, vol. 2, no. C, pp. 1288–1294, 1993.



Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional (México) por su apoyo a través de la Secretaría de Investigación y Postgrado. V. Prada-Jiménez agradece a CONACYT (México) y a la Universidad Central (Colombia) por su apoyo en la comisión de estudios de doctorado.



Control de Posición de un Robot Planar de 2GDL Implementado en Hardware-In-the-Loop

Control of the Position of a Planar Robot of 2 DOF Implemented in Hardware-In-the-Loop

Noemi Hernández Oliva^{1, γ}, Rosaura A. Suárez Santillán², Maria B. Calva Yáñez², Cuauhtémoc Morales Cruz², Gabriel Sepúlveda Cervantes², Edgar A. Portilla Flores².

1. Instituto Politécnico Nacional - CECyT 2 Miguel Bernard, Grupo de Investigación e Innovación en Mecatrónica (GIIM), Ciudad de México, México.

2. Instituto Politécnico Nacional - Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Cómputo, Grupo de Investigación e Innovación en Mecatrónica (GIIM), Ciudad de México, México.
γ. Autor correspondiente: nhernandez@ipn.mx

Resumen

En este artículo se presenta la implementación de un esquema de control de posición de un robot planar de dos grados de libertad (2GDL) en una plataforma Hardware-In-the-Loop (HIL), utilizando un control proporcional derivativo (PD) con compensación de gravedad, dicha implementación se lleva a cabo en dos tarjetas (control y modelo-robot, respectivamente) Discovery Kit STM32F407. Los datos obtenidos de la comunicación entre las dos tarjetas pueden ser visualizado utilizando un convertidor serial-USB conectado a una computadora con Matlab R17. Además, se realiza la validación de los datos obtenidos del sistema HIL con los resultados obtenidos al simular la planta completa. Se presentan los resultados, así como una discusión de estos. Finalmente se muestran las conclusiones y trabajos a futuro.

Palabras clave: robot planar, HIL, control PD+G, modelo dinámico, tarjeta electrónica.

Abstract

This paper presents the implementation of a position control scheme of a planar robot with two degrees of freedom (2DOF) on a Hardware-In-the-Loop (HIL) platform, using a proportional derivative control (PD) with compensation of gravity, this implementation is carried out in two boards (control and model-robot, respectively) Discovery Kit STM32F407. The data obtained from the communication between the two boards can be visualized using a serial-USB converter connected to a computer with Matlab R17. In addition, the validation of the data obtained from the HIL system is performed with the results obtained when simulating the complete plant. The results are presented as well as a discussion of these. Finally, the conclusions and future works are shown.

Keywords: Planar robot, HIL, PD+G control, dynamic model, electronic board.

Introducción

Hoy en día uno de los problemas clásicos de la robótica es el control de la posición, aun cuando no es un problema reciente su solución es de gran interés puesto que con las nuevas técnicas digitales se simplifica su solución. En [1] se presenta un esquema de control de posición en línea impulsado por electroencefalografía (EEG), para un brazo robot mediante adquisición de imágenes de los motores. En [2] se propone un nuevo método de control adecuado para brazos robóticos por medio



de un control de posición preciso sobre la base de un sistema de retroalimentación visual. En [3] se presenta una estrategia de control predictivo para el servicio visual de un brazo robótico antropomórfico en una tarea de rastreo de objetos. En los últimos años ha surgido una técnica denominada Hardware-In-the-Loop (HIL) que permite llevar a cabo la implementación de leyes de control de sistemas o plantas emuladas en tarjetas electrónicas, es decir, no es necesario tener la planta física ya que esta es emulada a partir de su modelo dinámico. En [4] se describe ampliamente en que consiste, la técnica HIL, definiéndola como un simulador en tiempo real para sistemas de control embebidos, en presencia de hardware y otro sistema de control, en el cual un simulador dinámico es reemplazado por el sistema en tiempo real, además de que en este se presenta el estado del arte de las diversas aplicaciones en las cuales se ha utilizado. El control PI discreto de un motor de corriente directa es presentado en [5], para lo cual se propone un simulador universal HIL para modelado y control de sistemas mecatrónicos. En [6] el principal objetivo es el control de sistemas de dirección eléctrica asistida de un automóvil basadas en la utilización de la heurística PSO (Particle Swarm Optimisation), aplicado a un banco de pruebas HIL lo cual permita mejoras en la vida del vehículo. En [7] se presenta un método para controlar el efector final y al mismo tiempo extraer cualquier impulso acumulado en el sistema, por medio del control se valida con experimentos utilizando un simulador robótico Hardware-In-the-Loop (HIL) compuesto por un brazo 7DOF (Degrees Of Freedom, grados de libertad GDL) montado en una base móvil 6GDL. En [8] se propone el control de retroalimentación de fuerza que pueda usarse para recrear un entorno libre flotante en el cual se prueba Space Robots (SR); una SR está acoplada en un sensor de fuerza y par conectado al efector final de una Plataforma robótica (RP), que se controla para anular las fuerzas y pares medidos. El diseño de un sistema activo de estabilización (ASAS) para un vehículo de una pista utilizando los efectos de un giroscopio y un modelo de control predictivo (MPC) se presenta en [9], dicha validación se lleva a cabo al evaluar la estrategia de control y la factibilidad del MPC, a partir del desarrollo de un simulador en tiempo real con dos tarjetas embebidas STM32F407 que contienen la dinámica del sistema y el control. Finalmente, en [10] se presenta la emulación de un robot de 2GDL por medio de un simulador HIL utilizando un control de posición por modos deslizantes, dicho control se realiza en una computadora personal y una tarjeta de adquisición de datos (6062E) mientras que la planta (ERM2GDL) se emula en una tarjeta electrónica (embebido (tarjeta de desarrollo TI C2000 Delfino F28377S LaunchPad)), un acondicionador de señales y una interfaz gráfica.

En estos trabajos la diversidad de problemas resueltos y la metodología empleada, las propuestas de HIL y las tarjetas empleadas son muy diversas. En este artículo se presenta la implementación en HIL del control de posición de un robot planar de 2-GDL, la cual se lleva a cabo con dos tarjetas Discovery Kit STM32F407.

El presente artículo está organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se presenta el modelo dinámico en espacio de estados del robot planar, los parámetros utilizados y la estrategia de control propuesta. En la sección 3 se describe la implementación HIL, los programas desarrollados y la comunicación entre las tarjetas. En la sección 4 se presentan las pruebas de simulación realizadas y una discusión de los resultados obtenidos. Finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones obtenidas.

Robot planar de 2 GDL

El robot planar de dos grados de libertad (2GDL) [11] que se muestra en la Figura 1, dicho robot está compuesto de dos articulaciones o juntas giratorias, dos eslabones rígidos de longitud r , con masas m_1 y m_2 respectivamente. Además de dos motores eléctricos localizados en el hombro y en



el codo del robot. Las aplicaciones en la industria varían desde tareas como pintura, traslado de objetos, ensamble, corte, entre otras.



Figura 1. Robot planar 2GDL [11].

Modelo del robot planar 2GDL en variables de estado

El modelo en espacio de estados para un robot planar 2GDL, fue reportado en [12], el cual describe el modelo dinámico del robot en las posiciones q_1 y q_2 , las velocidades están dadas por \dot{q}_1 y \dot{q}_2 , por lo que puede escribirse de la forma como se presenta en la ecuación (1):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\tilde{q}} \\ \mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1} [\boldsymbol{\tau}(t) - \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} - \mathbf{B}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} - \mathbf{G}(\mathbf{q})] \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde: M = Matriz de inercias

C = Matriz de fuerzas centrípetas y de Coriolis

B = Matriz de fricción viscosa

G = Par gravitacional

\tilde{q} = Vector de error de posicionamiento ($q_d - q$)

Parámetros del robot

Los parámetros empleados en el desarrollo de este artículo con los cuales se realizó la implementación del sistema completo de HIL, se muestran en la Tabla 1 [11].

Tabla 1. Parámetros del robot planar 2GDL.

Parámetro	Valor
Masa del eslabón 1 (m_1)	23,902 kg
Masa del eslabón 2 (m_2)	3,880 kg
Longitud del eslabón 1 (r_1)	0,45 m



Longitud del eslabón 2 (r_2)	0,45 m
Longitud del centro de masa del eslabón 1 (r_{c1})	0,091 m
Longitud del centro de masa del eslabón 1 (r_{c2})	0,048 m
Inercia del eslabón 1 (I_1)	1,266 kgm ²
Inercia del eslabón 2 (I_2)	0,093 kgm ²
Fricción viscosa del eslabón 1 (b_1)	2,288 Ns/m
Fricción viscosa del eslabón 2 (b_2)	0,175 Ns/m
Aceleración de la gravedad (g)	9,81 m/s ²

Control

La estrategia de control utilizada en este artículo es un control proporcional derivativo (PD) con compensación de gravedad [11], el cual ha sido ampliamente reportado en la literatura, se presenta en la ecuación (2):

$$\tau = Kp\tilde{q} - Kd\dot{q} + G(q) \quad (2)$$

donde: Kp = Constante proporcional

Kd = Constante derivativa

G = Par gravitacional

Implementación Hardware-In-the-Loop (HIL)

La implementación del sistema emulado en Hardware-In-the-Loop (HIL), se llevó a cabo en dos tarjetas Discovery Kit de STMicroelectronics (ver Figura 2), las principales características de la dicha tarjeta se presentan a continuación:



Figura 2. Tarjeta Discovery Kit STM32F4.



- Microcontrolador STM32F407VGMCU
- Microprocesador 32-bit ARM-Cortex
- 1024 Kb de RAM, velocidad máxima de reloj de 168 MHz
- Red ST-LINK/V2-A (Embedded)
- 2 puertos USB
- Audio DAC (Clase D)
- Fuente de alimentación (3V - 5V CD)
- LED (8, para diferentes propósitos)
- USB conector micro-AB
- Sensor de movimiento (ST-MEMS LIS302DL)

La emulación de la planta y del controlador se llevó a cabo en dos tarjetas electrónicas (Discovery kit), programadas en Simulink de Matlab R17, utilizando el Blockset de Waijung el cual puede descargarse desde su página de internet [13], dicho Blockset permite generar el código en lenguaje C del programa desarrollado en Simulink, y descargarlo al microcontrolador STM32F407VG de STMicroelectronics.

Tarjeta 1 – Control

En la tarjeta 1, se emuló el control PD con compensador de gravedad con la finalidad de mover el efector final del robot de un punto inicial (0,0) a un punto final ($\pi/4$, $\pi/2$), para llevar a cabo la emulación se programó el control en Simulink en el cual se utilizaron los bloques disponibles en el Blockset de Waijung (ver Figura 3), un bloque de configuración para la tarjeta, (en el cual se debe seleccionar el microcontrolador a emplear (STM32F407VG y un tiempo de muestreo de 0.001 segundos, para este caso), un bloque de configuración para puerto serial, que nos permitirá adquirir los datos de las salidas de la plata emulada, y enviar la salidas del control emulado, los parámetros empleados en dicho bloque se muestran en la Tabla 2.

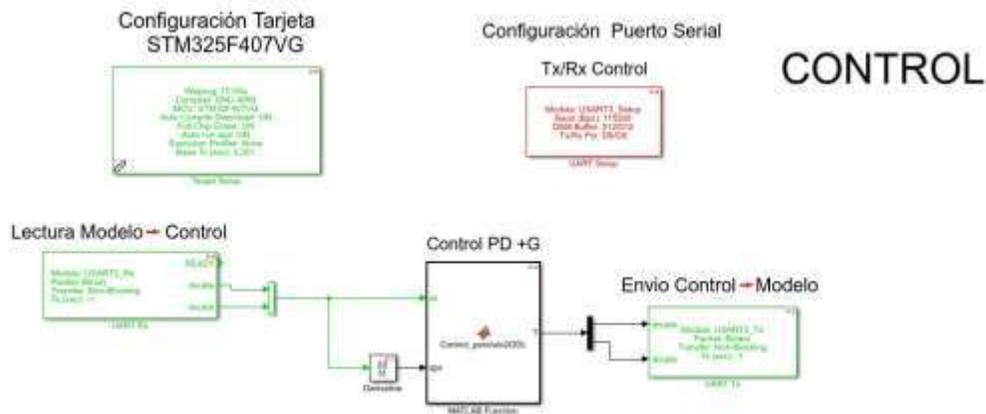


Figura 3. Diagrama en Simulink de Control descargado en la tarjeta 1.



Tabla 2. Parámetros de configuración del bloque UART Waijung.

Velocidad de transmisión (bps)	115200
Bits de datos	8
Bit de paridad	No
Bit de parada	1
Pin Tx	DB8
Pin Rx	DB9

Además, de dos bloques de comunicación UART, uno para transmitir (Tx) y otro para recibir (Rx) los datos provenientes de la Tarjeta 2, los cuales son posición y velocidad respectivamente. Finalmente se tiene un bloque de función propio de Simulink, el cual contiene el control por compensación de gravedad utilizado.

Tarjeta 2 – Modelo planta Robot planar 2GDL

En la tarjeta 2 se emuló el robot planar a partir de su dinámica (ver figura 4), de igual forma se requiere los bloques de configuración para la tarjeta, seleccionado el tipo de microcontrolador y tiempo de muestreo; los bloques de comunicación UART, para el envío (posición del efector final y datos a visualizar en Simulink) y recepción de datos (torque aplicado a la planta o ley de control).

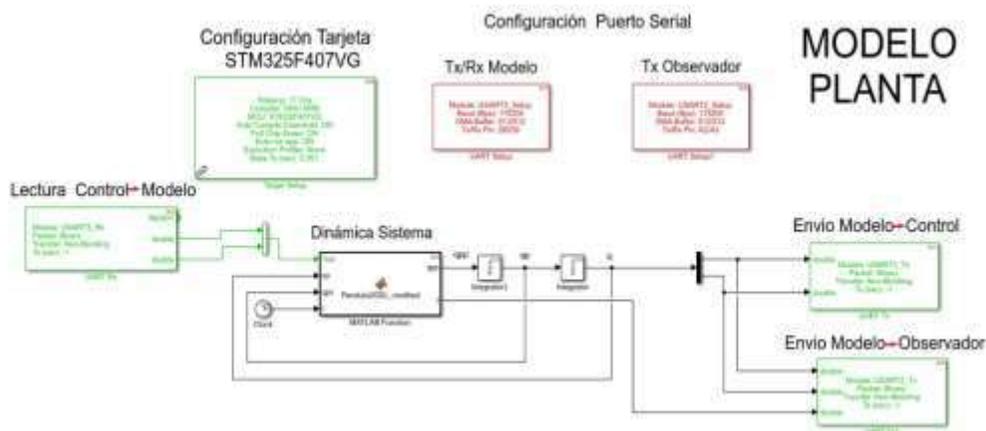


Figura 4. Diagrama en Simulink del modelo de la planta descargado en la tarjeta 2.

Finalmente, para conocer la salida del sistema completo emulado (planta-control) se realizó la adquisición de datos en tarjeta donde se emuló la planta, a partir de una comunicación UART, (ver



figura 5), el cual fue empleado para la lectura de los datos obtenidos de la comunicación entre ambas tarjetas a una PC con Simulink, por medio de un convertidor serial-USB.

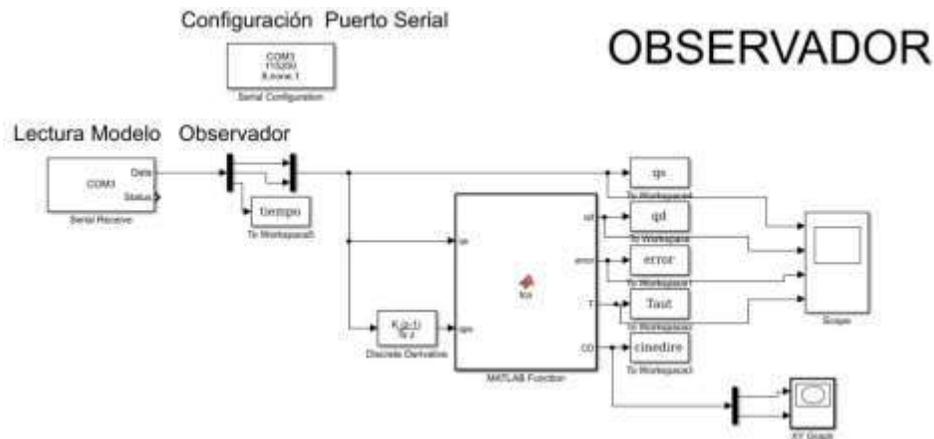


Figura 5. Programa en Simulink para la comunicación UART Tarjeta 1-2 y Matlab.

Conexión física de las tarjetas (comunicaciones)

La comunicación entre todos los dispositivos fue realizada por medio del uso de un puerto COM-Serial, este es un módulo de comunicación digital en el cual se puede realizar la comunicación entre dos dispositivos digitales a la vez. Cuenta con dos conexiones, recepción (RX) y transmisión (TX), con estos se pueden manejar cualquiera de los siguientes modos de comunicación.

- Full duplex. Puede recibir y enviar información digital simultáneamente.
- Duplex o Half-duplex. Solo es posible transmitir o recibir información, una cosa a la vez.
- Simplex. Cuando sólo es posible recibir o transmitir.

La función principal de un puerto serial, es la de empaquetar y des-empaquetar paquetes de datos binarios seriales. Este protocolo opera mediante tres condiciones digitales básicas: inicio de transmisión (IT), paridad (P) y fin de transmisión (FT). Estas condiciones son sincronizadas mediante un oscilador interno. El generador permite controlar la velocidad del puerto serial. Por lo que, la velocidad se mide en unidades de baud. Un módulo serial también se le conoce como UART (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter, Transceptor Asíncrono en español) o USART (Universal Synchronous and Asynchronous Receiver and Transmitter, Transceptor Síncrono y Asíncrono en español) o EUSART (Enhanced Universal Asynchronous Receiver and Transmitter, Transceptor Asíncrono Universal Mejorado en español) [14]. La tarjeta Discovery Kit cuentan con un periférico de comunicación UART para la transmisión de datos hacia otro dispositivo, en total cuenta con ocho canales USART, distribuidos en varios pines de la tarjeta, estos pueden consultarse con mayor detalle en el Manual de fabricante [15].

Con respecto al sistema HIL, la conexión física realizada se muestra en la Figura 6, para ambas tarjetas fue hecha con cables de conexión tipo jumper de 6" (15.24 cm) con conector hembra-hembra en sus terminales. Debido a que el número de puertos USB requeridos era mayor a los que se tenían en la PC, se utilizó un hub-USB para el convertidor serial-USB y para los cables de alimentación a 5VCD de las tarjetas el cual está conectado directamente con el puerto USB de una computadora personal.

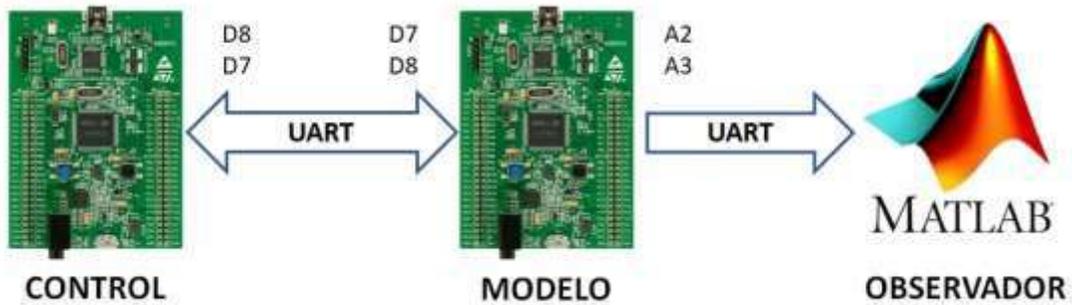


Figura 6. Conexiones físicas entre la tarjeta 1, tarjeta 2 y un convertidor serial-USB.

Resultados y discusión

La validación de los resultados obtenidos en el sistema implementado en HIL (sistema emulado ver Figura 7), se llevó a cabo, comparando dichos resultados con los obtenidos, al simular el sistema completo (planta – control) en Simulink (ver Figura 8).

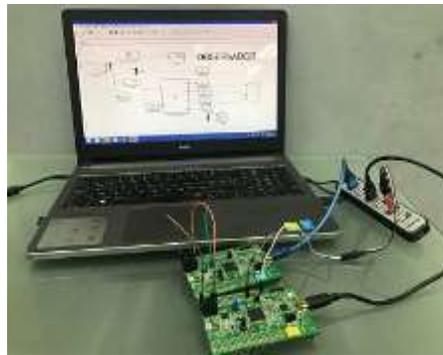


Figura 7. Sistema HIL.

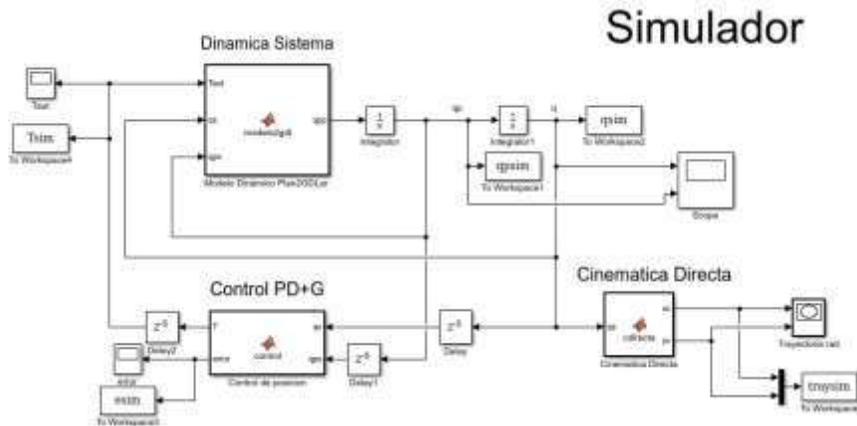


Figura 8. Programa en Simulink para la simulación del robot planar 2GDL.

En la Figura 9, se muestra la trayectoria recorrida por el efector final del robot planar, tanto simulado como emulado, para llegar a la posición deseada ($\pi/4$, $\pi/2$), como se puede observar el



recorrido que realiza es suave y al comparar las trayectorias del sistema emulado contra el sistema simulado se observa que ambos sistemas realizan el mismo recorrido.

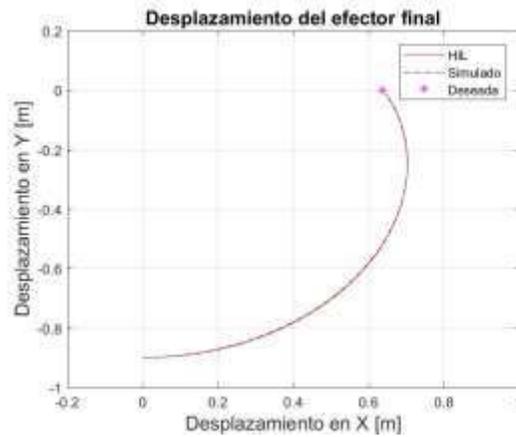


Figura 9. Gráfica de trayectoria realizada por el robot para llegar a la posición deseada.

En la Figura 10 se presenta las gráficas de posición de ambos sistemas (emulado y simulado) y la posición deseada ($\pi/4$, $\pi/2$), como se puede observar, en ambos sistemas se llega a la posición deseada, habiendo una diferencia entre las señales de los sistemas debido al tiempo de transmisión de los datos entre las tarjetas.

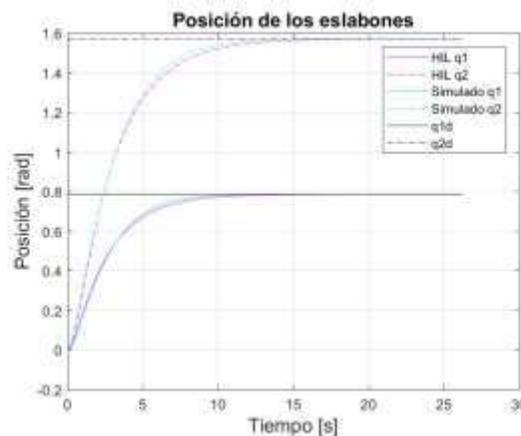


Figura 10. Gráfica de posición y posiciones deseadas obtenidas.

En la Figura 11, se muestran las gráficas correspondientes del error de posición para cada uno de los eslabones del robot planar, tanto para el sistema emulado (HIL) y el sistema simulado, como se puede observar, ambos errores tienden a cero, en un tiempo de 10 segundos para q_1 y de 15 segundos para q_2 .

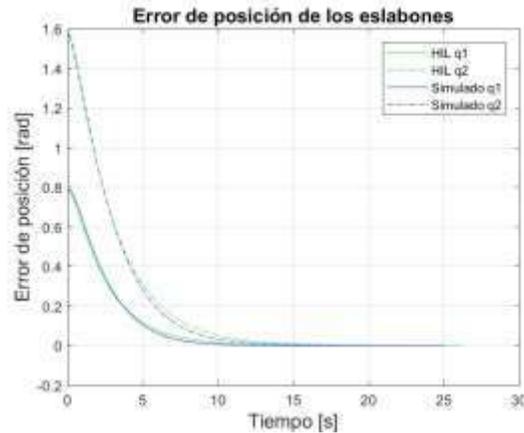


Figura 11. Gráfica de error de posición obtenidos de la simulación.

Finalmente, en la Figura 12 se muestran los pares aplicados a cada uno de los eslabones tanto para el sistema emulado (HIL), como para el simulado, como se puede observar ambos sistemas requieren el mismo par en cada eslabón para llegar a la posición deseada.

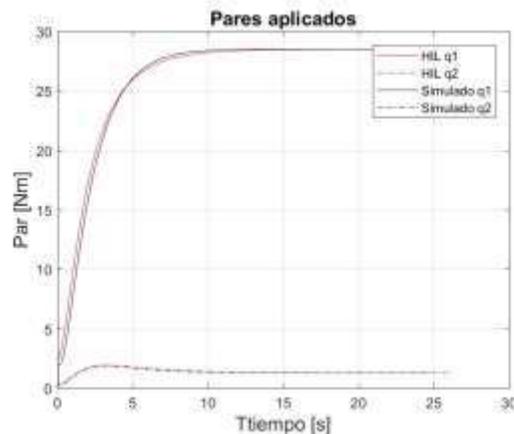


Figura 12. Posición inicial del robot y coordenadas del punto deseado.

Conclusiones

En este artículo se presentó la implementación de un sistema HIL para el control de posición de un robot planar, con dos tarjetas de desarrollo Discovery Kit STM32F407. Para validar el sistema propuesto se realizó la comparación entre los resultados obtenidos del sistema HIL y los obtenidos de las simulaciones hechas por medio de una computadora con Simulink.



La emulación del modelo del robot planar y el control de posición se llevó a cabo por medio de dos tarjetas electrónicas y un convertidor serial-USB a través de Simulink. Obteniéndose las señales correspondientes al comportamiento (posición) de la planta, se validó el funcionamiento de esta al comparar los resultados obtenidos con una simulación del sistema completo en Simulink. Los resultados obtenidos de ambos sistemas (emulado y simulado) presentan las mismas características. De lo anterior se concluye que el sistema emulado mediante HIL presentado en este trabajo es un reemplazo adecuado del sistema emulado en la PC dado que la diferencia entre ellos es menor de 0.1 rad.

Como trabajo a futuro se propone llevar a cabo la aplicación de diferentes leyes de control al sistema emulado, implementando dichas leyes en diferentes tarjetas electrónicas de control tales como la tarjeta Sensoray 626, NI-USB 6008, Ophyra Intesc, Hércules Launch Pad TI, entre otras (Ver Figura 13).



Figura 13. Diagrama esquemático de control.

Referencias

- [1] S. Bhattacharyya, A. Konar and D. Tibarewala, "Motor imagery and error related potential induced position control of a robotic arm", IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, vol. 4, no. 4, pp. 639-650, 2017.
- [2] H. Kim, Y. Tanaka, A. Kawamura, S. Kawamura and Y. Nishioka, "Improvement of position accuracy for inflatable robotic arm using visual feedback control method", 2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2015.
- [3] S. Satorres Martinez, J. de la Casa Cardenas, J. Gamez Garcia and J. Gomez Ortega, "Position predictive control of an anthropomorphic robotic arm using a time-of-flight camera", IEEE SENSORS 2014 Proceedings, 2014.
- [4] P. Sarhadi and S. Yousefpour, "State of the art: hardware in the loop modeling and simulation with its applications in design, development and implementation of system and control software", International Journal of Dynamics and Control, vol. 3, no. 4, pp. 470-479, 2014.
- [5] P. Talian, D. Perduková and P. Fedor, "Universal HIL Test Platform for Mechatronic Systems", Advances in Intelligent Systems and Computing, pp. 338-346, 2017.
- [6] C. Wagner, M. Flormann, T. Meister, R. Henze and F. Küçükay, "Model-based online optimization of EPS controller using HIL test benches Modellbasierte – Online-Optimierung von EPS-Applikationen an HiL-Prüfständen", Proceedings, pp. 567-580, 2017.



- [7] A. Giordano, G. Garofalo and A. Albu-Schaffer, "Momentum dumping for space robots", 2017 IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control (CDC), 2017.
- [8] N. Muraleedharan, D. Isenberg and I. Gentilini, "Recreating planar free-floating environment via model-free force-feedback control", 2016 IEEE Aerospace Conference, 2016.
- [9] T. Chu and C. Chen, "Design and Implementation of Model Predictive Control for a Gyroscopic Inverted Pendulum", Applied Sciences, vol. 7, no. 12, p. 1272, 2017.
- [10] D. Bedolla-Martínez, F. Ramírez-Leyva and J. Arias-Aguilar, "Simulación Hardware-in-the-loop de un robot manipulador con base en un controlador digital de señales", La Mecatrónica en México, Vol. 7, No.1, pp. 25-36, 2018.
- [11] Reyes Cortés, F. (2011). Robótica. Control de robots manipuladores. 1st ed. México: Alfaomega Grupo Editor, p.335.
- [12] R. Kelly, V. Santibáñez and A. Loría, Control of robot manipulators in joint space. London: Springer, 2005.
- [13] "Waijung Blockset", Waijung.aimagin.com, 2018. [Online]. Disponible en: <http://waijung.aimagin.com/>. [Consultado: 04- May- 2018].
- [14] A. Caicedo Pedrera, Arduino para principiantes/ Arduino for beginners, 2da ed. [S.l.]: Createspace Independent P., 2017, pp. 1-93.
- [15] "UM1472 User Manual", https://www.st.com/content/st_com/en.html, 2018. [Online]. https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/70/fe/4a/3f/e7/e1/4f/7d/DM00039084.pdf/files/DM00039084.pdf/jcr:content/translations/en.DM00039084.pdf. [Consultado: 10- Jun- 2018].

Agradecimientos

Al CONACYT por la beca otorgada para estudios de posgrado. También se agradece al Instituto Politécnico Nacional por el apoyo otorgado a través de la Secretaria de Investigación y Posgrado por medio de los proyectos SIP20181162 y SIP2018808.



Un Enfoque Alternativo para la Optimización Topológica de Estructuras Reticulares

An Alternative Approach for Topology Optimization of Reticular Structures

M. Pedroza Villalba¹, E. Santiago Valentín¹, E. Vega Alvarado¹, E. A. Portilla Flores^{1, γ}, E. Alcalá Fazio²

1. Instituto Politécnico Nacional, Juan de Dios Bátiz s/n esq. Miguel Othón de Mendizábal, Nueva Industrial Vallejo, Ciudad de México, México.
2. Instituto Universitario de investigación del Automóvil (INSIA), Campus Sur, Madrid, España.
γ. Autor correspondiente: aportilla@ipn.mx

Resumen

En este trabajo se presenta un enfoque alternativo para la optimización topológica de armaduras. El problema de diseño es llevado a un caso de optimización topológica basado en la minimización de volumen; la representación de las soluciones se realiza mediante una codificación binaria para indicar si un elemento es activo/inactivo. Para simular los efectos de las condiciones mencionadas, se asignan dos perfiles, uno bajo la norma UNE y un perfil nulo, evitando así problemas en el análisis estructural. El rendimiento de las estructuras se evalúa mediante un análisis estático con el Método de Elemento Finito (MEF) y aplicando la teoría de grafos para reducir el gasto computacional descartando configuraciones no factibles. El enfoque propuesto está implementado en ANSYS®, usando un algoritmo genético para resolver el problema de optimización y obtener la mejor armadura. Como caso de estudio se emplearon dos armaduras, obteniéndose una reducción de volumen de más del 50 % con respecto a las estructuras iniciales; verificando la utilidad del enfoque propuesto como una herramienta de alta calidad para el diseño en ingeniería.

Palabras clave: Armadura, optimización topológica, algoritmo genético, estructura reticular.

Abstract

In this work, an alternative approach for the topological optimization of truss-type structures is presented. The design problem is address as a topological optimization case based on volume minimization; the solution representation is doing by a binary coding to indicate if an element is active/inactive. Two profiles are assigned for simulating the effects of the aforementioned conditions, one profile under UNE standard and a null profile in order to avoid complications in the structural analysis. The structural performance is evaluated by a static analysis using the Finite Element Method (FEM) and applying graph theory to reduce the computational cost by discarding the undesired configurations. The proposed approach is implemented in ANSYS®, and a genetic algorithm was used to solve the optimization problem and obtain the best truss. Two trusses were considered as a case study, and the result was a volume reduction of more than 50% off the initial structures; this shows the utility of the proposed approach as a high-quality tool for structural design in engineering applications.

Keywords: Truss, topology optimization, genetic algorithm, reticular structure.

Introducción

El diseño estructural es un campo de la ingeniería cuyo objetivo es determinar la geometría, materiales, costos, condiciones y requerimientos de seguridad que produzcan estructuras más



ligeras y de formas innovadoras [1], [2]. El uso de las computadoras ha permitido reducir considerablemente el tiempo requerido para el proceso de diseño, a través de herramientas tales como los programas de diseño e ingeniería CAD-CAE. Además, por medio del método de elemento finito (MEF) es posible tener un panorama del comportamiento de un objeto bajo circunstancias específicas; este método discretiza la estructura en un conjunto de unidades, las cuales representan una fracción de material del área de diseño, de forma que se tenga suficiente información para conocer la posible respuesta de la estructura.

Las armaduras son uno de los tipos principales de estructuras utilizadas para aplicaciones de ingeniería; estas estructuras están formadas por un conjunto de miembros conectados entre sí por elementos tipo viga [3]. La optimización topológica tiene como objetivo obtener la geometría óptima de una estructura, de forma que se cumpla con los requerimientos establecidos por el diseñador. Su enfoque está basado en el dominio de diseño: si los elementos representan una cantidad determinada de material, se trabaja sobre un dominio continuo [4], mientras que si los miembros representan una posición específica con un número determinado de elementos, se tiene un dominio discreto [5]. Derivado de lo anterior, la optimización topológica tiene como objetivo eliminar un cierto número de elementos para satisfacer una meta de diseño correspondiente a una propiedad física o de rendimiento, considerando una serie de restricciones de diseño; normalmente se busca la reducción del peso estructural [6] o el incremento de la rigidez a partir de reducir la energía de deformación de la estructura [7], cumpliendo una serie de condiciones de esfuerzo y desplazamiento.

La optimización en el medio discreto se deriva de procesos tales como la optimización de tamaño, con la cual se obtienen las dimensiones óptimas de los elementos; o de forma, con la que se obtiene la posición óptima de los puntos de interés (conexiones) [8]. Se ha desarrollado una serie de trabajos en este contexto para lograr formas innovadoras de bajo costo; sin embargo, normalmente se requiere un alto costo computacional debido a los datos involucrados y los criterios por satisfacer. En [9] se optimiza tanto el tamaño como la forma de las armaduras espaciales mediante un algoritmo de optimización (TLBO) que considera las imperfecciones geométricas y la sensibilidad en las limitaciones de pandeo por compresión y tracción. En [10] se desarrolla una optimización topológica con base en el método de estructura inicial, usando un algoritmo para eliminar elementos inútiles, cinemáticamente inestables, y no deseados. En [11] se implementó una optimización de mapeo de varianza media restringida (MVMO) para problemas de optimización de armaduras; el algoritmo tiene una solución única y variantes basadas en población con un esquema de penalización adaptativa para restricciones geométricas y mecánicas. En [12] se utilizó un algoritmo de búsqueda multi-gravitatorio acelerado y modificado para resolver la optimización del tamaño de las armaduras a gran escala, donde los problemas requieren menos análisis estructural. En [13] se desarrolló un método determinístico de ciclo único (SLDM) que se aproxima a las restricciones determinísticas y utiliza variables mixtas; este método es una combinación entre SLDM y un algoritmo de evolución diferencial mejorado para resolver problemas de optimización de diseño basado en confiabilidad (RBDO).

Los trabajos mencionados manejan la optimización topológica de estructuras como una consecuencia de la optimización de forma y/o tamaño, tomando generalmente como variables de diseño las áreas de sección transversal de los miembros. Las restricciones se consideran dentro de un rango de respuesta en cada elemento [4]; el proceso de adición y/o eliminación de elementos es



con base en la interpretación del diseñador, generalmente descartando aquellos elementos cuya área de sección transversal esté por debajo de un valor mínimo. En algunos trabajos se considera el problema con elementos sobrepuestos, lo cual reduce considerablemente el número de miembros y a su vez limita el margen de solución; por consecuencia, deben usarse tratamientos adicionales para este tipo de configuraciones.

En este trabajo se presenta un enfoque alternativo para la optimización topológica de armaduras, que no requiere de un proceso previo de optimización de forma y/o tamaño de cada miembro estructural. El caso de diseño topológico es llevado a un problema de optimización con base en la minimización de volumen, donde se considera la meta de diseño mediante la contabilización de los elementos activos y valorando el rendimiento estructural por medios energéticos, distinguiendo así entre las diferentes configuraciones sin dejar de cumplir requisitos operacionales ante un caso de carga definido. El problema es resuelto mediante un algoritmo genético obteniéndose así la mejor estructura; la restricción geométrica se considera para reducir el tiempo de cómputo al descartar configuraciones no factibles. Se programó una rutina principal con base en FORTRAN, mientras que la evaluación de la respuesta se implementó con una subrutina de análisis estructural, ambas desarrolladas en el ambiente Programming Design Language de ANSYS®. Se tomó como caso de estudio para probar el enfoque propuesto a una estructura cargada, considerada con dos densidades de mallado, de la cual se requiere obtener la geometría con volumen mínimo y que sea capaz de soportar las condiciones de carga establecidas. Los resultados muestran una reducción de peso de 53.16% y 83.23% con respecto al volumen original, dependiendo de la densidad de mallado.

El presente trabajo está distribuido de la siguiente manera: en la Sección 2 se describe el enfoque propuesto, detallando tanto la traducción del problema de diseño a un problema de optimización topológica como el método de solución aplicado. En la Sección 3 se muestra la implementación del enfoque propuesto en ANSYS®, mientras que en la Sección 4 se presenta el caso de estudio y el análisis de los resultados obtenidos. Finalmente, en la Sección 5 se describen las conclusiones y los trabajos a futuro.

Enfoque propuesto de optimización topológica estructural

El objetivo de diseño del enfoque propuesto es la reducción del peso de una estructura reticular con el fin de bajar costos, pero de manera tal que se cumplan las restricciones de operación establecidas originalmente. La estructura inicial está definida considerando un medio discreto, con la posibilidad de conocer así el número de miembros n y de conexiones existentes. Dadas estas características, entre las opciones para definir las variables de decisión para la optimización estructural se pueden mencionar la codificación binaria, definición por preformas y el uso de grafos [14]; en los problemas de diseño topológico es frecuente utilizar las dos primeras, haciendo que cada elemento sea una variable.

Para determinar los elementos necesarios y no necesarios se utiliza la representación en forma de cadena binaria, expresando directamente si un elemento está activo/inactivo. Así, el vector de variables corresponde a la expresión (1).

$$\vec{x} = x_1, x_2, \dots, x_n \quad (1)$$



Es posible enfocar el problema a los elementos, tomando en cuenta que todos ellos deben tener las mismas características si se considera como constantes a la fuerza de gravedad y a la densidad del material, con lo que el problema de diseño es de carácter topológico (geometría). Por lo tanto, el peso depende directamente del Número de Elementos Activos *NEA* en la estructura, como se expresa en las Ecs. (2) a (5):

$$V_T = \sum_{i=1}^n v_i \cdot x_i \quad (2)$$

$$\min f(\vec{x}) = NEA N(\vec{x}) \quad (3)$$

$$N(\vec{x}) = \sum_{i=1}^n x_i ; \forall x_i = 1 \quad (4)$$

$$x_i \in [0, 1] \quad (5)$$

Al existir elementos con las mismas características y longitudes predefinidas, es difícil diferenciarlos solo con la consideración anterior; por lo tanto, se aplica una medida de respuesta estructural, la Densidad de Energía de Deformación *SED* [15]. Ésta mide la energía de deformación por unidad de volumen/área de material, con lo cual es posible detectar que miembros son necesarios y cuáles no. La estructura debe cumplir dos requisitos: 1) estar esforzada de manera similar, esto es, los elementos presentes deben tener una respuesta similar, y 2) se debe disminuir la energía de deformación para que la rigidez aumente. Esto último es válido cuando las modificaciones se realizan sobre una estructura inicial; por otra parte, cuando se inicia la optimización a partir de un conjunto de posibles combinaciones estructurales en el peor caso la rigidez tiende a cero, por lo cual se debe disminuir la *SED* máxima de la estructura, como lo muestran las expresiones (6) y (7).

$$\min Diff(\vec{x}) = SED_{max} - SED_{min} \quad (6)$$

$$\min Rg(\vec{x}) = SED_{max} \quad (7)$$

Así, la función objetivo del problema de optimización queda establecida de acuerdo con la expresión (8):

$$\min f(\vec{x}) = N(\vec{x}) \cdot norm1 + \frac{Diff(\vec{x})}{norm2} + \frac{Rg(\vec{x})}{norm3} \quad (8)$$

Los parámetros *norm1*, *norm2* y *norm3* son valores de normalización, ya que los criterios en la combinación lineal mostrada tienen diferentes rangos de magnitud, dependiendo del caso de carga. El problema de optimización no está planteado como multiobjetivo, dado que no hay prueba de que algún criterio modifique a los demás de forma inversamente proporcional.



Consideraciones de diseño

El diseño de armaduras está sujeto a una serie de condiciones para garantizar que la estructura puede ser portadora de carga. Las estructuras deben cumplir criterios básicos como son el carácter geométrico, esfuerzo máximo y desplazamiento, así como criterios adicionales de manufactura, pandeo y frecuencias, entre otros. Para esta propuesta únicamente se consideran cuestiones básicas, ya que las adicionales dependen del problema específico.

Los primeros aspectos a tomar en cuenta son de carácter geométrico, porque a partir de ellos es posible determinar si la estructura puede ser analizada por MEF, lo cual puede ser una ventaja en cuestión de tiempo de cómputo. La consideración consiste en conocer la topología de la estructura de manera tal que ésta tenga conexiones entre los puntos de interés; con ello se comprueba que la estructura es capaz de transmitir la fuerza aplicada por un conjunto de elementos hasta los puntos de contacto o de movimiento nulo. Por lo tanto, una forma de corroborar esta condición es mediante la teoría de grafos [16], verificando que exista al menos una conexión continua entre los puntos de carga y los de soporte fijo, tomando a los nodos como vértices y a los miembros como aristas.

Para verificar los caminos se utiliza la matriz de adyacencia, estableciendo un punto de partida diferente del punto meta; este proceso es iterativo hasta alcanzar dicha meta. Si existe un camino válido entonces $e = 1$ y la estructura puede ser analizada; en caso contrario $e = 0$ y la estructura es penalizada, declarando la variable a con un valor predeterminado, tal como se muestra en la expresión (9). El valor alto de a sirve para evitar que se realice el análisis estructural a una estructura inviable, reduciendo el tiempo de computo.

$$a = \begin{cases} 1E12 & \text{si } e = 0 \\ 0 & \text{si } e = 1 \end{cases} \quad (9)$$

A continuación se toman en cuenta las consideraciones de respuesta aplicando el concepto de esfuerzo. El esfuerzo máximo σ_{max} es uno de los criterios más utilizados para medir el desempeño, indicándose que dicho esfuerzo en una estructura no deberá exceder el esfuerzo admisible σ_{ad} [17], tal como se indica en la ecuación (10):

$$\sigma_{max} < \sigma_{ad} \quad (10)$$

El esfuerzo admisible está en función del material utilizado y de un factor de seguridad f_s establecido por el diseñador, como se expresa en la ecuación (11). Para este caso se considera el máximo como aquel presente en el elemento con mayor requerimiento a nivel global, ya que el esfuerzo en los elementos restantes es menor a este valor. Si el esfuerzo máximo es superior al de diseño, la variable b almacena la diferencia de estos dos valores, permitiendo verificar qué tan deficiente es una topología, como se indica en la expresión (12).

$$\sigma_{ad} = \sigma_u / f_s \quad (11)$$

$$b = \begin{cases} \sigma_{max} - \sigma_{ad} & \text{si } \sigma_{max} > \sigma_{ad} \\ 0 & \text{si } \sigma_{max} \leq \sigma_{ad} \end{cases} \quad (12)$$



Mediante la *SED* es posible identificar aquellos elementos de la estructura que no contribuyen a la rigidez estructural (miembros no necesarios); para estos elementos, la *SED* está en el rango $[0,1]$, donde el elemento es una conexión directa entre los nodos soporte y los nodos restringidos. Esto también aplica para los elementos que están aislados de la geometría principal y aquellos que no están conectados a otro(s), como se muestra en la Fig. 1.

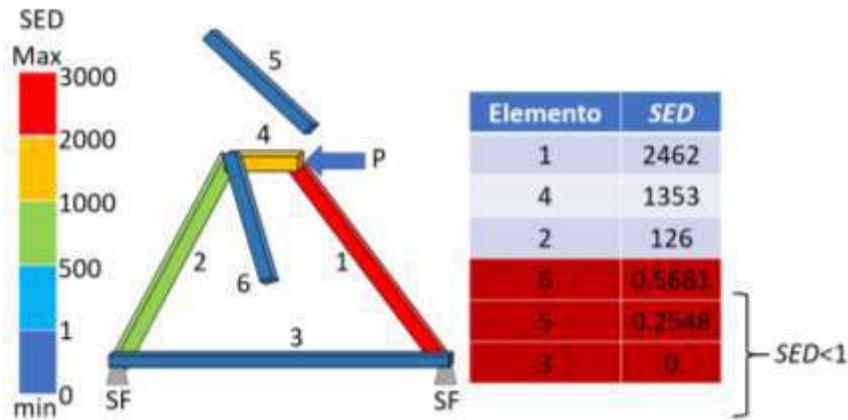


Figura 1. Elementos sin aporte de rigidez.

Finalmente, los elementos se contabilizan y su suma se asigna a una variable, de acuerdo con la expresión (13),

$$w = \begin{cases} 0 & \text{si } sed_i > 1 \forall x_i = 1 \\ \sum_{i=1}^n x_i & \text{si } sed_i < 1 \forall x_i = 1 \end{cases} \quad (13)$$

El problema de optimización no lineal con restricciones se establece en las expresiones (14) a (19), basado en la reducción de peso y considerando limitaciones de esfuerzo y de energía para el diseño de un sistema estructural portador de carga.

$$\text{Encontrar } \vec{x} = x_1, x_2, \dots, x_n \quad (14)$$

$$\min f(\vec{x}) = N(\vec{x}) \cdot \text{norm1} + \frac{\text{Diff}(\vec{x})}{\text{norm2}} + \frac{\text{Rg}(\vec{x})}{\text{norm3}} \quad (15)$$

Sujeto a:

$$g_1(\vec{x}): \sigma_{\max} - \sigma_{ad} \leq 0 \quad (16)$$



$$\mathbf{g}_2(\vec{x}): \mathbf{SED}_i - \mathbf{1} \leq \mathbf{0} \quad (17)$$

$$\mathbf{h}_1(\vec{x}): \mathbf{e} - \mathbf{1} = \mathbf{0} \quad (18)$$

$$\mathbf{x}_i \in \{\mathbf{0}, \mathbf{1}\} \quad i = \mathbf{1}, \mathbf{2}, \dots, \mathbf{n} \quad (19)$$

Algoritmo Genético

El computo evolutivo fue introducido en la década de 1960 por Rechenberg, y en 1975 Holland desarrolla el Algoritmo Genético (AG) en su libro *Adaptación en sistemas naturales y artificiales* [18]. Los AGs son métodos de búsqueda estocástica basados en la genética Mendeliana y la evolución Darwiniana [19]. Estos algoritmos tienen tres parámetros de operación: la población inicial *NP*, el cruce *CR* y la mutación *muta*; una cadena de cromosomas representa a cada individuo [20].

El AG comienza con una población de posibles soluciones generadas aleatoriamente, a las cuales se calcula su aptitud. Algunos de estos individuos se seleccionan como padres y se produce una nueva población (o generación) de posibles soluciones (descendientes) aplicando el operador de cruce a la población principal y luego aplicando el operador de mutación a su descendencia.

En la *cruza* se realiza la combinación de la información a partir de los padres, cada individuo es seccionado en *n* partes y la generación de nuevas soluciones se lleva a cabo combinando las partes de cada padre con las de los demás, hasta completar una población de hijos con la misma dimensión que la de los padres. El proceso de seccionado presenta diversas variantes: cruza en un punto, cruza en dos puntos, cruza multipunto, cruza uniforme, entre otros. Por su parte, la *mutación* da variación a los individuos nuevos reemplazando al azar algunos de sus genes tratando de mejorar sus características.

La inserción de un nuevo individuo generalmente requiere el reemplazo de otro miembro de la población [18]. Las iteraciones que implican el reemplazo de la generación original por una nueva se repiten hasta que se satisfacen los criterios de paro [21][22]:

- Se alcanzó el máximo de generaciones.
- Se completó el número máximo de evaluaciones de la función objetivo.
- No hay cambio significativo en las generaciones siguientes.

Implementación

Si bien las topologías están representadas en forma binaria, al momento de la implementación se utiliza una consideración distinta a la asignación 1/0 para activo/inactivo; ello debido a que el manejo del valor cero puede producir inconsistencias en los cálculos. Por ello, se utilizan dos tipos de perfiles: para los miembros activos se asigna un perfil cuadrado estandarizado bajo la norma UNE-EN-10210-1-2007, mientras que para los inactivos se asigna un perfil nulo; las características de cada perfil se muestran en la



Tabla 1. Aunque el perfil 0 tiene dimensiones muy pequeñas permite realizar el análisis estructural con MEF; el principio operativo se implementa en el método de pseudo densidades para un medio continuo donde el módulo de Yong del elemento inactivo se establece un valor en el orden de $1e-5$, evitando así errores en el análisis estático [23].

Tabla 1 Perfiles estructurales.

Característica	Perfil 0	Perfil 1
Área de sección transversal (m^2)	1E-10	0.121E-2
Momento torsional de inercia IXX (m^4)	1E-14	0.176E-5
Área Momento de inercia IYY (m^4)	1E-14	0.118E-5
Área Momento de inercia IZZ (m^4)	1E14	0.118E-5
Espesor TKZ (m)	1E-3	8E-2
Espesor TKY (m)	1E-3	8E-2

Algoritmo de optimización

Para resolver el problema de optimización anterior, tomando en cuenta la traducción del fenotipo (topología) a un genotipo binario (cadena) mostrada en la Fig. 2, se utiliza un algoritmo genérico AG para manejar variables de este tipo; como heurística permite resolver problemas no lineales y no requiere que este sea doblemente continuamente diferenciable, además de mostrar una serie de resultados si el problema es multimodal.

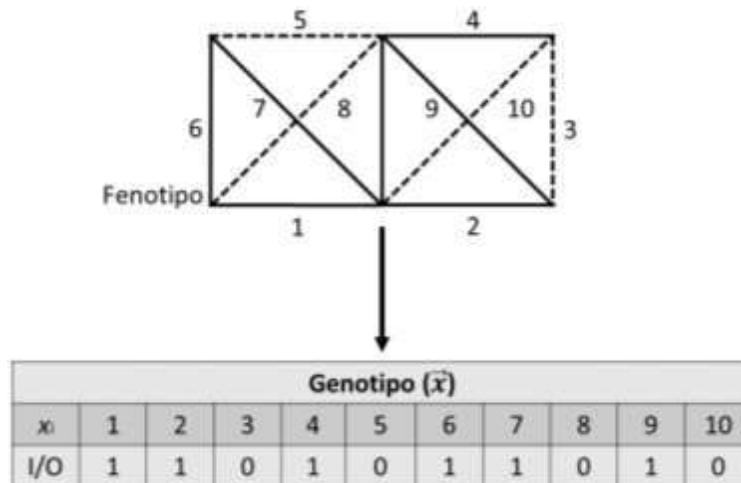


Figura 2. Conversión de fenotipo a genotipo.

Dado que el algoritmo genético está diseñado para optimización global, en casos reales es necesario utilizar una técnica de manejo de restricciones. Para esta propuesta se adoptó una estrategia para llevar un problema no lineal con restricciones a un caso no restringido, como se muestra en las expresiones (20) y (21). Si la armadura generada no es factible, su Suma de Violación de



Restricciones SVR será diferente de cero y la función objetivo se obtendrá de un valor alto P y el valor de SVR ; por otro lado, si SVR es cero, la función objetivo es calculada con la Ec. (15).

$$SVR = \begin{cases} 0 \\ a \text{ conexion} \\ b + w \text{ esfuerzo; sed} \end{cases} \quad (20)$$

$$FO = \begin{cases} f(\vec{x}) & \text{si } SVR = 0 \\ P + SVR & \text{si } SVR > 0 \end{cases} \quad (21)$$

El algoritmo genético implementado parte de un conjunto inicial de estructuras, donde a cada variable se asigna un valor aleatorio indicando su perfil dentro de los dos tipos ya mencionados (ver Fig. 3). Posteriormente, para cada estructura se evalúan SVR y FO .

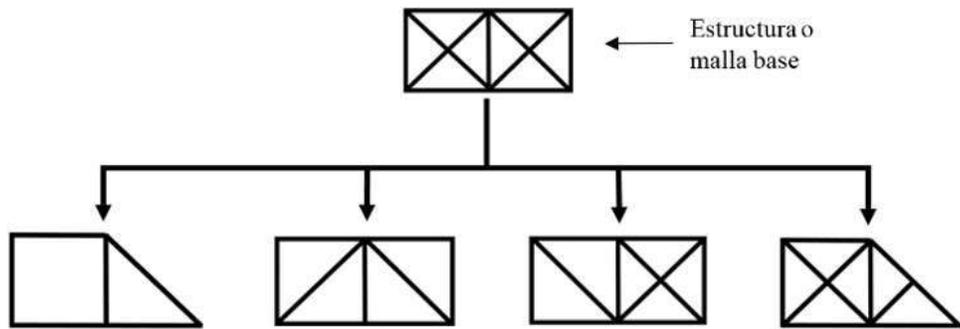


Figura 3. Generación de población inicial, ejemplificado para $NP=4$.

Para escoger a los padres de los nuevos individuos se emplea una selección por *ruleta proporcional* [24], calculando la probabilidad de selección de cada estructura y girando la ruleta hasta obtener la población de padres. Mediante la *cruza en un punto* [25], se toman dos armaduras para generar dos nuevas combinaciones; usando el parámetro CR se obtienen dos segmentos de cada padre y se combinan, como se muestra en la Fig. 4. La mutación se realiza a través del complemento (ver Fig. 5); esto es, si el cromosoma es 1 el valor cambia a 0 y viceversa, siempre y cuando se cumpla la condición de mutación. El remplazo es por actualización total generacional, sustituyendo adicionalmente al peor hijo con el mejor padre.

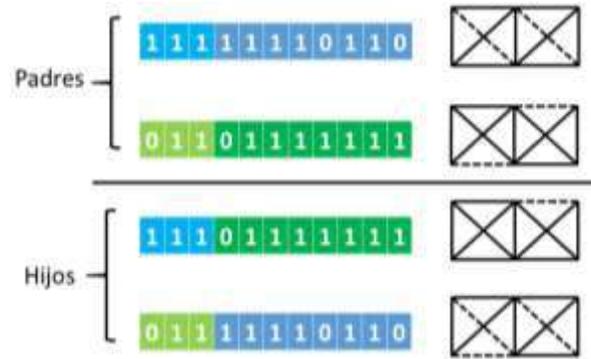


Figura 4. Cruza.



Figura 5. Mutación.

Caso de estudio

Para probar el enfoque propuesto se considera un caso de estudio resuelto en [26], donde se trata una optimización estructural de tamaño. Se requiere obtener la estructura con menor peso posible que continúe cumpliendo las restricciones de diseño, partiendo de una estructura inicial definida; para este trabajo se analizó a la estructura sin considerar elementos sobrepuestos, tomando todas las dimensiones de longitud en metros. Adicionalmente, para la solución del caso de estudio se utilizaron dos mallas con densidades diferentes, con quince y ciento veintiséis elementos, respectivamente.

El material seleccionado para representar una viga en cantiléver 2D es acero estructural ASTM A36, con un módulo de elasticidad $E=200\text{GPa}$, relación de Poisson $\nu=0.3$ y límite elástico $\sigma_u=400\text{MPa}$; como factor de seguridad se consideró $f_s=1.5$. Los parámetros *norm1*, *norm2* y *norm3* se establecen con valores de 100, 1000 y 10 respectivamente.

El algoritmo se implementó en una plataforma de cómputo con un procesador Intel Core i7@3.5 GHz y 32 GB de memoria RAM, programado en ANSYS® APDL Release 18.1. Para la solución del caso de estudio se realizaron treinta simulaciones por cada tipo de mallado, con las siguientes configuraciones:

- Malla 1: población $N_p=100$, máximo de iteraciones=100, factor de cruce $Cr=0.9$, y mutación $Muta=0.1$.
- Malla 2: población $N_p=100$, máximo de iteraciones=1000, factor de cruce $Cr=0.9$, y mutación $Muta=0.001$.



Armadura de baja densidad

La estructura mostrada en la Fig. 6 corresponde a una armadura con densidad baja formada por quince elementos; dicha estructura soporta una carga puntual $F=10,000$ N y está empotrada en sus extremos laterales izquierdos, donde $L=1$. El peso de la estructura inicial es $W=1,186.73$ kg, utilizando el perfil 1.

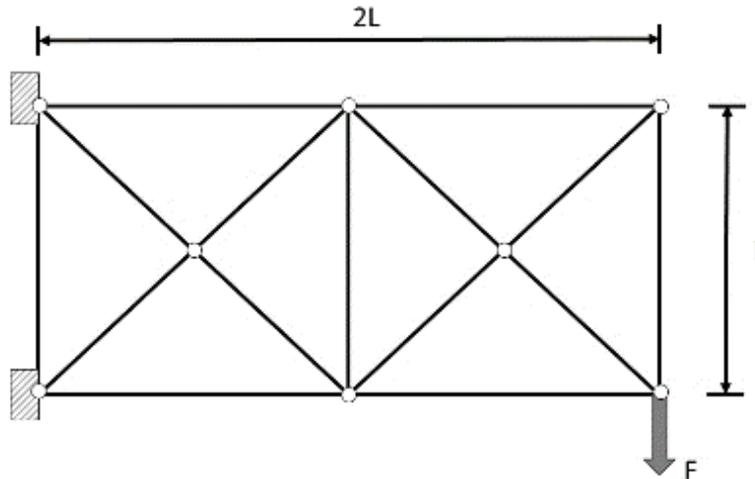


Figura 6. Problema de diseño con malla 1.

Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 7, y concuerdan con lo reportado en [26] al generarse la misma topología; la armadura final pesa $W=546.49$ kg, lo que representa un 53.95% de volumen eliminado con respecto al original.

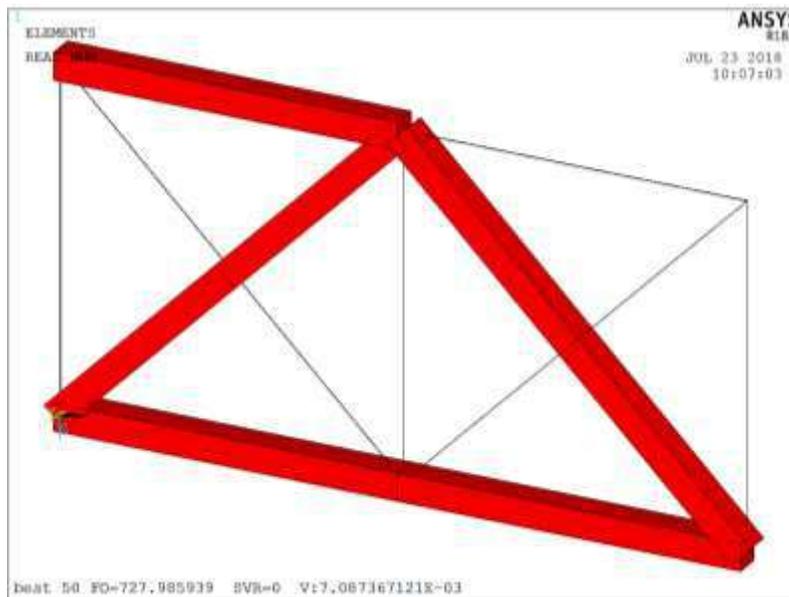


Figura 7. Armadura resultante malla 1.



El esfuerzo máximo corresponde al elemento de mayor exigencia, el cual es $\sigma=43.16$ MPa y se muestra en la Fig. 8; dicho valor no supera el esfuerzo admisible, con $SED=2666.6$ J/m³ con una diferencia de 1987.8 Joules/m³ entre el elemento con mayor esfuerzo y el de menor.

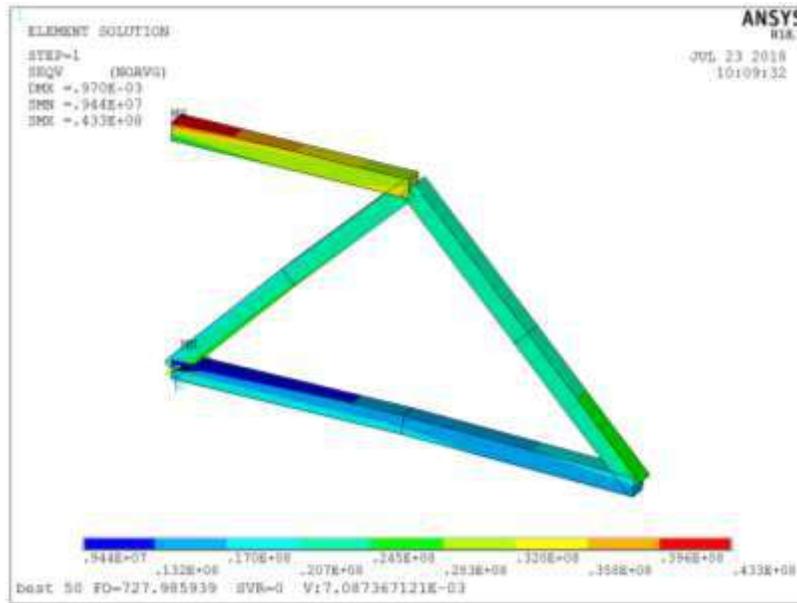


Figura 8. Esfuerzo equivalente de Von Mises.

Armadura de alta densidad

La estructura mostrada en la Fig. 9 soporta una carga puntual $F=10,000$ N empotrada en sus extremos laterales izquierdos, donde $L=1$ y un peso $W=3,239.03$ kg con el perfil 1. Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 10, donde se observa la misma topología generada para la armadura con densidad baja. El peso total es $W=546.49$ kg, lo cual es un 83.13% de volumen eliminado con respecto al original.

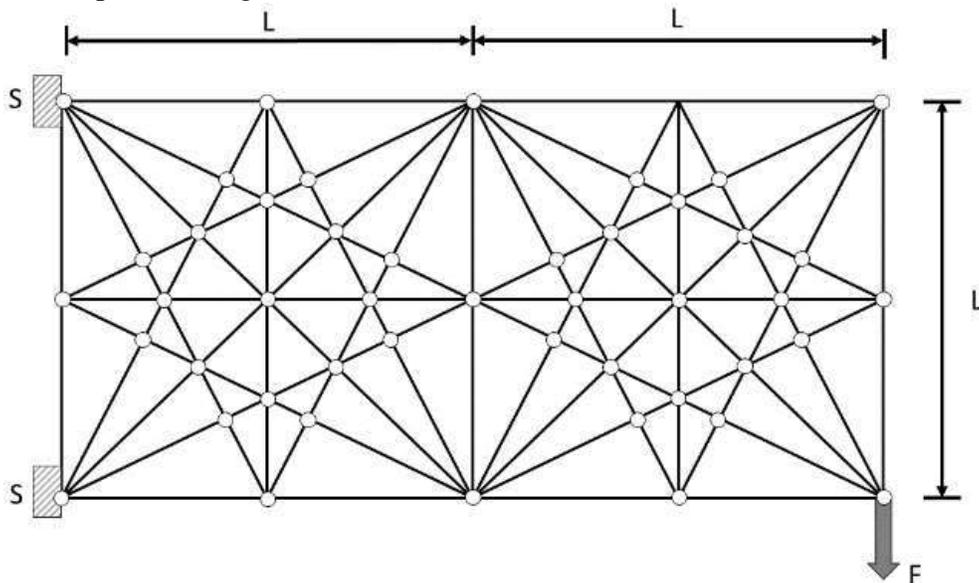


Figura 9. Problema de diseño con malla 2.

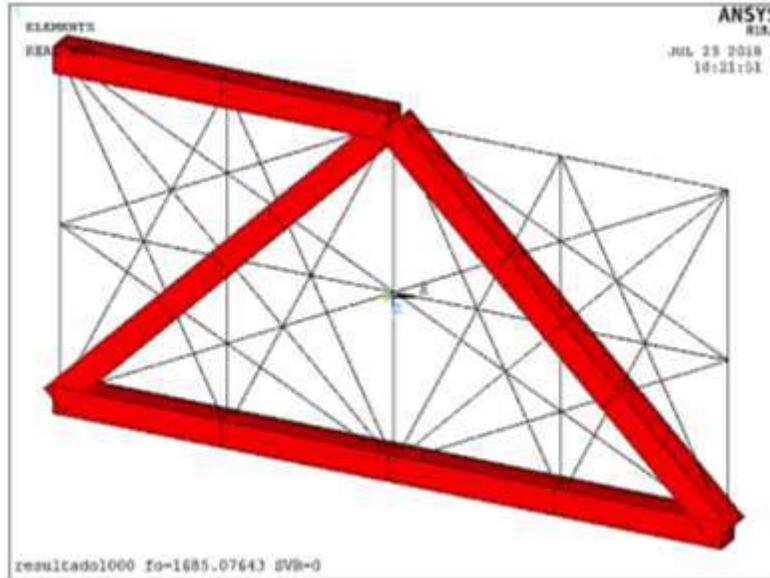


Figura 10. Armadura resultante malla 2.

El esfuerzo mostrado en la Fig. 11 es $\sigma=43.3$ MPa, correspondiente al elemento con mayor exigencia, el cual no supera el esfuerzo admisible. El *SED* está en un valor de $SED_{max}=4943.7$ J/m³, con una diferencia de 3695.38 J/m³ entre los valores mínimo y máximo por elemento.

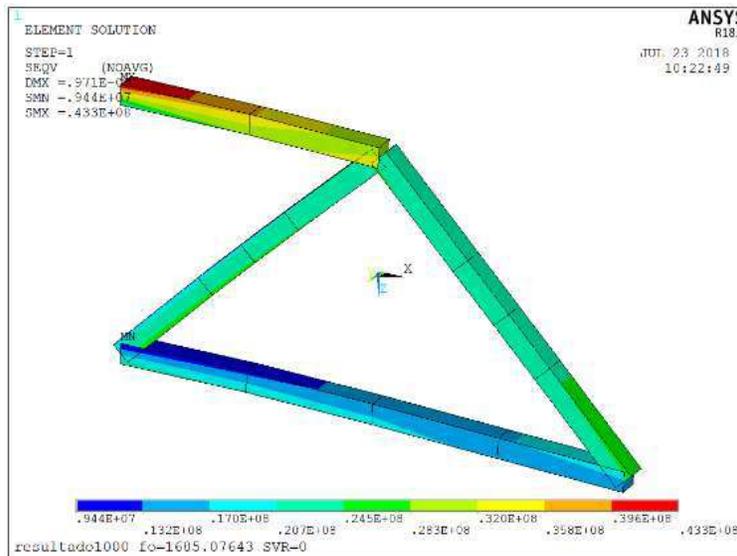


Figura 11. Esfuerzo equivalente de Von Mises.

Conclusiones

En este trabajo se presenta un enfoque alternativo para la optimización topológica de armaduras basado en reducción de peso; para ello se usó una combinación lineal compuesta por la meta de diseño y una medida de rendimiento para diferenciar estructuras. Se utilizan dos perfiles



estructurales para representar a los elementos activos e inactivos en la estructura y llevar a cabo el análisis de funcionamiento. Por medio de una restricción geométrica es posible reducir el tiempo de cómputo, detectando si la estructura no es apta para el análisis estructural; asimismo, se mide la capacidad a través de restricciones básicas de respuesta estructural.

El problema de optimización correspondiente es resuelto mediante un algoritmo genético con adecuaciones, obteniéndose geometrías factibles con reducciones de más del 50% con respecto a los volúmenes iniciales. En los resultados se observa la misma armadura para ambos mallados, aunque por razones de densidad la reducción de volumen es de más del 83% en el caso de la malla fina. Mediante el MEF se comprobó que los requerimientos estructurales se cumplen de manera favorable a pesar de contar con menos miembros, verificándose así su factibilidad.

El uso de los perfiles estructurales como estrategia para identificación y aplicación en la optimización topológica permite el análisis de una estructura, sin introducir discontinuidades al momento de verificar las trayectorias a lo largo de la estructura con apoyo de la matriz de adyacencia. Los resultados obtenidos indican que el enfoque propuesto es una herramienta reconfigurable de alta calidad que puede ser usada en otras aplicaciones de ingeniería para labores de optimización estructural. Como trabajos a futuro se contempla el resolver otros casos de carga correspondientes a estructuras diversas, utilizando variaciones tanto en el material como en el tipo de mallado, para determinar su efecto sobre el resultado final además de implementar la optimización de forma con base a un conjunto de perfiles con área transversal distinta para determinar el perfil más adecuado.

Referencias

- [1] L. A. Hoel, N. J. Garber, and A. W. Sadek, *Transportation Infrastructure Engineering: A Multimodal Integration*. Cengage Learning, 2007.
- [2] R. M. Piralla and R. Meli, *Diseño estructural*. Limusa, 2001.
- [3] N. Changizi, S. M. Asce, M. Jalalpour, and A. M. Asce, “Stress-Based Topology Optimization of Steel-Frame Structures Using Members with Standard Cross Sections: Gradient-Based Approach,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 143, no. Sigmund 2011, pp. 1–15, 2017.
- [4] M. Carrasco, B. Ivorra, and A. M. Ramos, “Stochastic topology design optimization for continuous elastic materials,” *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 289, pp. 131–154, 2015.
- [5] S. Chen, X. Shui, and H. Huang, “Improved genetic algorithm with two-level approximation using shape sensitivities for truss layout optimization,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 55, no. 4, pp. 1365–1382, 2017.
- [6] Y. Wu, Q. Li, Q. Hu, and A. Borgart, “Size and Topology Optimization for Trusses with



- Discrete Design Variables by Improved Firefly Algorithm,” *Math. Probl. Eng.*, vol. 2017, 2017.
- [7] T. Hagishita and M. Ohsaki, “Topology optimization of trusses by growing ground structure method,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 37, no. 4, pp. 377–393, 2009.
- [8] Q. X. Lieu, D. T. T. Do, and J. Lee, “An adaptive hybrid evolutionary firefly algorithm for shape and size optimization of truss structures with frequency constraints,” *Comput. Struct.*, vol. 195, pp. 99–112, 2018.
- [9] F. Haghpanah and H. Foroughi, “Size and Shape Optimization of Space Trusses Considering Geometrical Imperfection-Sensitivity in Buckling Constraints,” *Civil Engineering Journal*, vol. 3, no. 12, pp. 1314–1326, 2017.
- [10] A. Shakya, P. Nanakorn, and W. Petprakob, “A ground-structure-based representation with an element-removal algorithm for truss topology optimization,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, no. February, pp. 1–19, 2018.
- [11] M. Aslani, P. Ghasemi, and A. H. Gandomi, “Constrained mean-variance mapping optimization for truss optimization problems,” *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, vol. 27, no. 6, pp. 1–17, 2018.
- [12] M. Khatibinia and H. Yazdani, “Accelerated multi-gravitational search algorithm for size optimization of truss structures,” *Swarm Evol. Comput.*, vol. 38, pp. 109–119, 2018.
- [13] V. Ho-Huu, T. Le-Duc, L. Le-Anh, T. Vo-Duy, and T. Nguyen-Thoi, “A global single-loop deterministic approach for reliability-based design optimization of truss structures with continuous and discrete design variables,” *Eng. Optim.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–20, 2018.
- [14] N. Aulig and M. Olhofer, “Evolutionary computation for topology optimization of mechanical structures: An overview of representations,” *2016 IEEE Congr. Evol. Comput. CEC 2016*, no. July, 2016.
- [15] S. Yoder *et al.*, “Characterization of topology optimized Ti-6Al-4V components using electron beam powder bed fusion,” *Addit. Manuf.*, vol. 19, pp. 184–196, 2018.
- [16] M. Giger and P. Ermanni, “Evolutionary truss topology optimization using a graph-based parameterization concept,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 32, no. 4, pp. 313–326, Oct. 2006.
- [17] S. Chu, L. Gao, M. Xiao, Z. Luo, H. Li, and X. Gui, “A new method based on adaptive volume constraint and stress penalty for stress-constrained topology optimization,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 57, no. 3, pp. 1163–1185, Mar. 2018.
- [18] S. N. Sivanandam and S. N. Deepa, *Introduction to Genetic Algorithms*. Springer Berlin Heidelberg, 2007.



- [19] K. Jebari, “Selection Methods for Genetic Algorithms,” *Int. J. Emerg. Sci.*, vol. 3, pp. 333–344, 2013.
- [20] K. Deb, “Genetic Algorithm in Search and Optimization: The Technique and Applications,” *Proc. Int. Work. Soft Comput. Intell. Syst.*, pp. 58–87, 1998.
- [21] M. Solgi, O. Bozorg-Haddad, and H. Loaiciga, *Meta-heuristic and Evolutionary Algorithms for Engineering Optimization*. 2017.
- [22] M. Safe, J. Carballido, I. Ponzoni, and N. Brignole, “On Stopping Criteria for Genetic Algorithms,” in *Advances in Artificial Intelligence -- SBIA 2004*, 2004, pp. 405–413.
- [23] O. Sigmund, “A 99 line topology optimization code written in Matlab,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 21, no. 2, pp. 120–127, 2001.
- [24] R. Kumar and , Jyotishree, “Blending Roulette Wheel Selection & Rank Selection in Genetic Algorithms,” *Int. J. Mach. Learn. Comput.*, pp. 365–370, 2012.
- [25] C. Kane and M. Schoenauer, “Topological optimum design using genetic algorithms,” *Control Cybern.*, vol. 25, no. 5, pp. 1059–1087, 1996.
- [26] A. J. Torii, R. H. Lopez, and M. A. Luersen, “A local-restart coupled strategy for simultaneous sizing and geometry truss optimization,” *Lat. Am. J. Solids Struct.*, vol. 8, no. 3, pp. 335–349, 2011.

Agradecimientos

Todos los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional de México por su apoyo a través de la Secretaría de Investigación y Posgrado con el proyecto SIP20182097; los autores Martín Pedroza Villalba y Eric Santiago Valentín agradecen al CONACYT de México por su apoyo mediante becas para estudios de doctorado.



Diseño de un Sistema de Control de Dirección para un Robot Virtual de Dos GDL, Mediante la Interacción de una Señal de EOG.

Design of a Direction Control System for a Virtual Robot with Two Degrees of Freedom, Through the Interaction of an EOG Signal.

Francisco David Pérez Reynoso^{1, γ}, Paola Andrea Niño Suárez¹, Manuel Faraón Carbajal Romero¹, Oscar Fernando Avilés Sánchez²

1. Departamento en Ingeniería de Sistemas Robóticos y Mecatrónicos, Instituto Politécnico Nacional – ESIME Azcapotzalco, Ciudad de México, México
2. Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Grupo de Investigación Davinci Universidad Militar Bogotá, Colombia.

γ. Autor correspondiente: davr0302@gmail.com

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo de una interfaz hombre-máquina, la cual mediante la detección de umbrales de voltaje de una señal de electrooculografía, EOG, genera entradas digitales para una máquina de estados diseñada para controlar la dirección del movimiento de un robot virtual de dos grados de libertad. Se diseñó un sistema de instrumentación biomédica para obtener señales de la orientación ocular mediante EOG, el sistema captura la información de dos canales para el movimiento horizontal y vertical, mediante el procesamiento digital de señales se obtiene información sobre su amplitud y su frecuencia de muestreo para la posterior implementación de filtros digitales y del espectro de frecuencia de dicha señal, aplicando instrumentación virtual de programación en tiempo real en LabVIEW. La máquina de estados se encarga de generar las instrucciones para los movimientos de cambio de dirección que realiza un robot virtual, que se observa en una interfaz gráfica.

Palabras clave: EOG, instrumentación, filtros, control, máquina de estados

Abstract

In this paper the development of a man-machine interface is presented, which by means of the detection of voltage thresholds of an electrooculography signal, EOG, generates digital inputs for a state machine designed to control the direction of the movement of a virtual robot of two degrees of freedom. A biomedical instrumentation system was designed to obtain signals of the ocular orientation through EOG, the system captures the information of two channels for the horizontal and vertical movement, by means of the digital signal processing it obtains information about its amplitude and its sampling frequency for the subsequent implementation of digital filters and the frequency spectrum of said signal, applying virtual programming instrumentation in real time in LabVIEW. The state machine is responsible for generating instructions for the movements of change of direction made by a virtual robot, which is observed in a graphical interface.

Keywords: electrooculography, instrumentation, digital filters, state machine.

Introducción

Se considera a una persona con discapacidad a un individuo que tiene una o más deficiencias físicas, mentales o sensoriales que le pueden impedir su participación plena y efectiva en igualdad



de condiciones, al interactuar con distintos ambientes del entorno social. Una de las problemáticas más relevantes para las personas con discapacidad es su completa dependencia para realizar tareas básicas de supervivencia como el comer, por lo cual en la última década se ha generado gran interés en el desarrollo de tecnologías de asistencia que permitan a estas personas recobrar independencia en tareas cotidianas [2].

En sistemas robotizados desarrollados para brindar asistencia, se ha encontrado que uno de los problemas principales en la práctica es disponer de una adecuada interfaz entre la persona que sufre una discapacidad y la máquina diseñada para ayudarla. Por ello, se han explorado diversas opciones de acuerdo al grado de discapacidad de los usuarios. El caso más extremo es asistir a personas que no puede mover ninguna extremidad, como es el caso de la cuadriplejía y solo se tiene acceso a señales por el movimiento de la cabeza, del rostro mediante gestos o de los ojos.

Para este tipo de usuarios se han desarrollado interfaces hombre – máquina basadas en movimientos de cabeza conocidas como “joystick de cabeza” (head controlled joystick), se implementan con cámaras externas, acelerómetros o luces infrarrojas. En [1] se presenta SIAMO (sistema integral para movilidad asistida) una silla de ruedas para discapacitados o ancianos. Los módulos que componen este sistema son: navegación y la interfaz hombre-máquina que comprende una pantalla para mostrar el estado del sistema, una unidad de guía de reconocimiento de palabras y guía de expulsión de aliento. En [2] se desarrolló una interfaz para la conducción de sillas de ruedas motorizadas mediante movimientos de cabeza. Tales movimientos son adquiridos por un sistema de detección de posición sin contacto, basado en un arreglo de emisores-detectores de infrarrojos. En [3] el movimiento de la cabeza se utiliza como interfaz para manejar un prototipo de silla de ruedas cuyo sistema de control ha sido desarrollado mediante la aplicación de una red neuronal artificial (ANN, por sus siglas en inglés) que permite reconocer los comandos dados por el movimiento de la cabeza. En [4] se propone el uso de un joystick de cabeza infrarrojo ubicado en la silla de ruedas, como una interfaz humana para dispositivos electrónicos como computadoras, tabletas o teléfonos inteligentes. Este sistema captura el movimiento del joystick para mover el cursor o el puntero de cualquier dispositivo digital.

También se han desarrollado sistemas utilizando movimientos faciales como el presentado en [5], donde se describen los comandos generados por sistemas de visión para detectar los movimientos de la cara que son aplicados para la orientación de una silla de ruedas eléctrica para minusválidos o personas con discapacidades severas. Usando un rastreador y un detector difuso, el sistema calcula los movimientos de la cara del usuario y se generan comandos para conducir la silla de ruedas, el sistema no es invasivo, permite visibilidad y libertad de movimientos de la cabeza, trabaja incluso para personas de diferentes características físicas.

En los casos anteriores es necesario tener ciertos componentes activos sobre o en contacto con la cabeza del usuario lo que de alguna forma ocasiona incomodidad o impiden el movimiento natural del paciente. Es por ello que en las últimas dos décadas se han destacado las ventajas de una interfaz basada en EOG sobre otras interfaces convencionales. En el desarrollo de interfaces capaces de suministrar comodidad al paciente al brindar independencia motriz, se ha tomado como opción viable la electrooculografía (EOG), dado que es una señal de mínima invasión, su comportamiento es casi lineal para ángulos de mirada de 40 grados y permite detectar movimientos con una precisión inferior a 2 grados. Dentro de los trabajos que se encontraron relacionados con



la finalidad de este proyecto está el presentado en [6], un sistema de control de posición de un robot industrial FANUC LR Mate 200iB por medio de señales de EOG que se capturan con una interfaz con electrodos de montaje superficial que se conectan a una computadora para adquirir las señales que son utilizadas para generar el comando del robot, es decir, mover el robot en una dirección particular, el usuario debe realizar un movimiento ocular rápido en la dirección deseada y el robot comienza a moverse continuamente (10 mm/s) en esa dirección. Para detener el robot, el usuario debe mirar hacia el lado opuesto de la dirección. Para el control del brazo robótico en velocidad se desarrolló un sistema con distintos umbrales. Los mismos autores en [7] desarrollan un algoritmo para obtener los comandos oculares de las señales EOG: izquierda, derecha, arriba, abajo o nada. Que se obtienen a partir del movimiento de los ojos, estos comandos son proporcionales a la amplitud de la señal. Una vez se tiene tomada la decisión de la dirección en la que se ha mirado, se envía dicha instrucción de movimiento al brazo robot teniendo en cuenta determinados aspectos mediante una serie de máquinas de estados que permiten controlarlo.

En [8] se desarrolla un algoritmo robusto que discrimina varios movimientos del ojo de la señal de EOG. Cubren todos los movimientos del ojo, incluidos el parpadeo doble/triple y guiño izquierdo/derecho. El método se llama "algoritmo de velocidad ideal" que compara la velocidad real del EOG con una velocidad ideal diseñada bajo una suposición de eliminación total de ruido. Los movimientos oculares detectados se utilizan para una interacción humano-computadora (HCI, por sus siglas en inglés) entre una persona y un robot móvil. En [8] se presenta otro método para controlar y guiar robots móviles. Para enviar diferentes comandos se utiliza EOG para detectar movimientos sacádicos oculares y saber dónde está mirando el usuario.

Diseño del Concepto de la interfaz hombre-máquina.

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una interfaz hombre-máquina a partir de diseñar un sistema capaz de obtener la dirección de la mirada mediante la detección de movimientos oculares, e implementar una máquina de estados que contemple la orientación ocular diagonal, para activar el cambio de transición y así indicar que tipo de trayectoria debe seguir un robot manipulador asistencial de dos grados de libertad. El sistema está compuesto por dos etapas, como se observa en la Figura 1, una etapa de adquisición de las señales de EOG que se conecta a una computadora mediante una tarjeta de adquisición de señales DAQ6008 y una etapa de procesamiento de señales que se desarrolló como un sistema de instrumentación virtual, utilizando el software LabVIEW.



Figura 1. Diagrama de bloques del EOG.



Para diseñar la interfaz hombre-máquina planteada, debido a la gran cantidad de información que se obtiene en una señal de EOG fue necesario desarrollar un sistema especializado para obtener a partir de ella los movimientos de arriba, abajo, derecha e izquierda del globo ocular. Se implementó un sistema de adquisición con dos canales de EOG: movimiento vertical (V) y movimiento horizontal (H), un sistema de acondicionamiento de señal y un sistema de procesamiento digital. En la Figura 2 se presenta un diagrama en bloques del sistema desarrollado, la interfaz hombre-máquina y el robot a controlar.

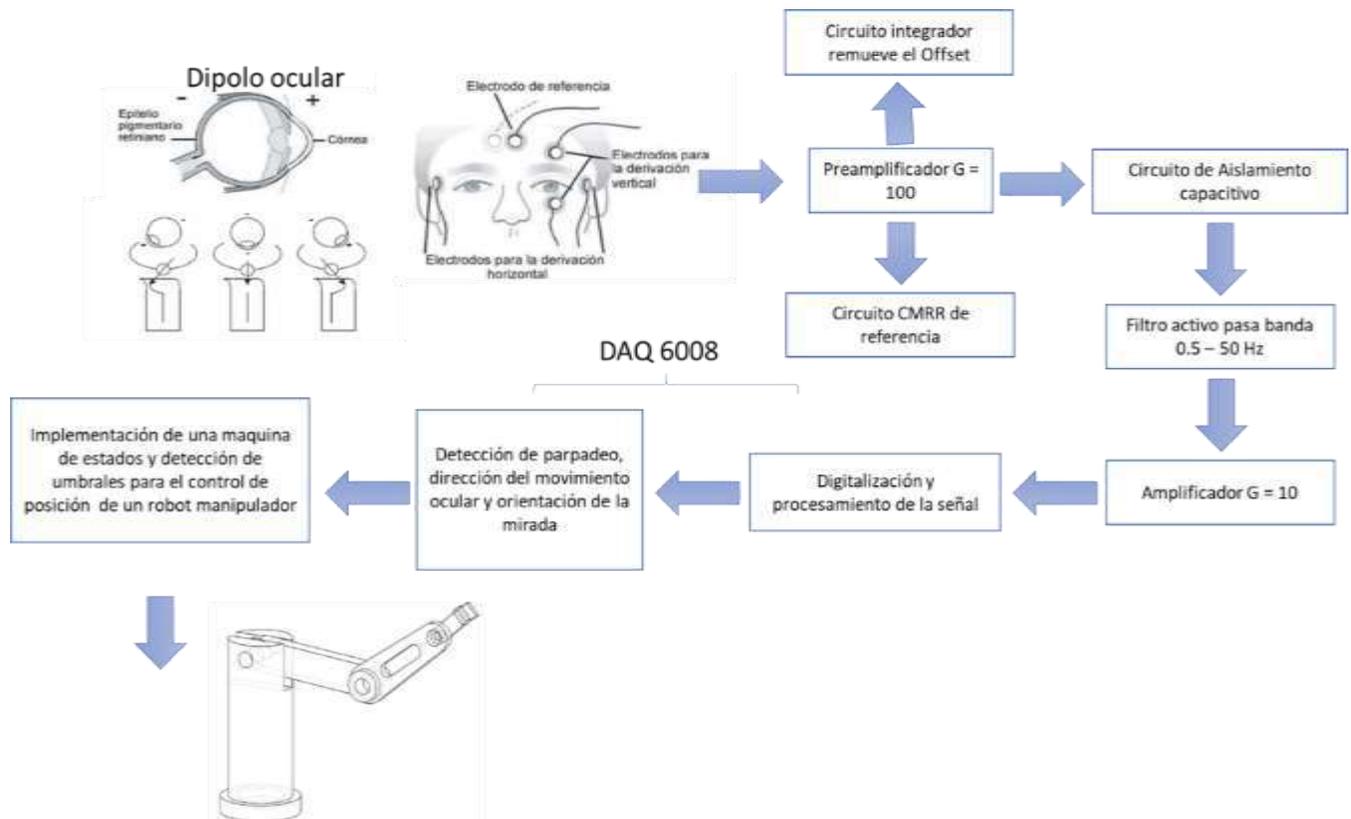


Figura 2. Diagrama de bloques de la Interfaz Hombre-Maquina

En las siguientes secciones se describen las etapas principales que componen el sistema, la de adquisición de señales de EOG y la de su procesamiento digital.

Sistema de adquisición y acondicionamiento de las señales de EOG

Como se presentó en la sección anterior, Figura 2 se utilizaron módulos de instrumentación biomédica para la adquisición de las señales de EOG, se implementaron dos canales para los movimientos oculares, uno para los de tipo horizontal y el otro para los de tipo vertical. Se realizó un procesamiento analógico de las señales adquiridas para acondicionarlas y así digitalizarlas con el fin de ingresarlas como variables al programa desarrollado en el software LabVIEW para su procesamiento digital. En esta sección se presentan los módulos del sistema de adquisición implementados.



Adquisición de la señal de EOG

En el ojo humano se presenta una diferencia de potencial permanente entre la córnea y la membrana de Bruch, situada ésta en la parte posterior del ojo, de aproximadamente 0.4 mV a 1 mV , siendo la primera más positiva que la segunda. El EOG es un método de registro de los movimientos oculares basado en la detección de la diferencia de potencial entre la córnea y la retina. El origen de esta diferencia se encuentra en el epitelio pigmentario de la retina y permite considerar la presencia de un dipolo ocular, donde la córnea corresponde al extremo positivo y la retina al extremo negativo [10]. Al generarse un movimiento ocular desde la posición central directo hacia la periferia, la retina se aproxima a un electrodo mientras que la córnea se acerca al electrodo del lado contrario. Este cambio en la orientación del dipolo se refleja en un cambio en la amplitud y la polaridad de la señal EOG, de tal forma que analizando estos cambios en la señal adquirida se puede determinar el movimiento del globo ocular, [11]. Se ha determinado en varios estudios que las señales EOG muestran amplitudes que pueden ir de $5\ \mu\text{V}$ a $20\ \mu\text{V}$ por grado de desplazamiento, con un ancho de banda entre 0 Hz a 50 Hz , [12].

La señal EOG puede obtenerse fácilmente mediante un par de electrodos conectados en la vecindad de los ojos más un electrodo de referencia, generando así dos canales que registran el movimiento horizontal y el movimiento vertical. Para el registro del movimiento ocular de los dos ojos en total se conectan cinco electrodos, como se puede observar en la Figura 3, [12].



Figura 3. Colocación de electrodos de EOG.

Los electrodos a utilizar para adquirir la señal de EOG son electrodos de plata/cloruro de Plata (Ag/AgCl). En su forma básica se trata de un conductor metálico en contacto con la piel y se utiliza una pasta electrolítica para establecer y mantener en contacto. Antes de adherirlo al cuerpo, su superficie cóncava se cubre con una pasta electrolítica, los electrodos toman la señal de la superficie cutánea como una diferencia de potencial para llevarla a una etapa de acondicionamiento donde es amplificada, filtrada y digitalizada.

Arquitectura de Hardware del Sistema de Acondicionamiento.

La etapa de acondicionamiento de la señal adquirida está conformada por cuatro módulos uno de amplificación, un corrector basal, un sistema de aislamiento y un filtro. El diagrama esquemático de conexión de la arquitectura de hardware del sistema de acondicionamiento se observa en la Figura 4. A continuación se detallan cada uno de los módulos de instrumentación implementados.

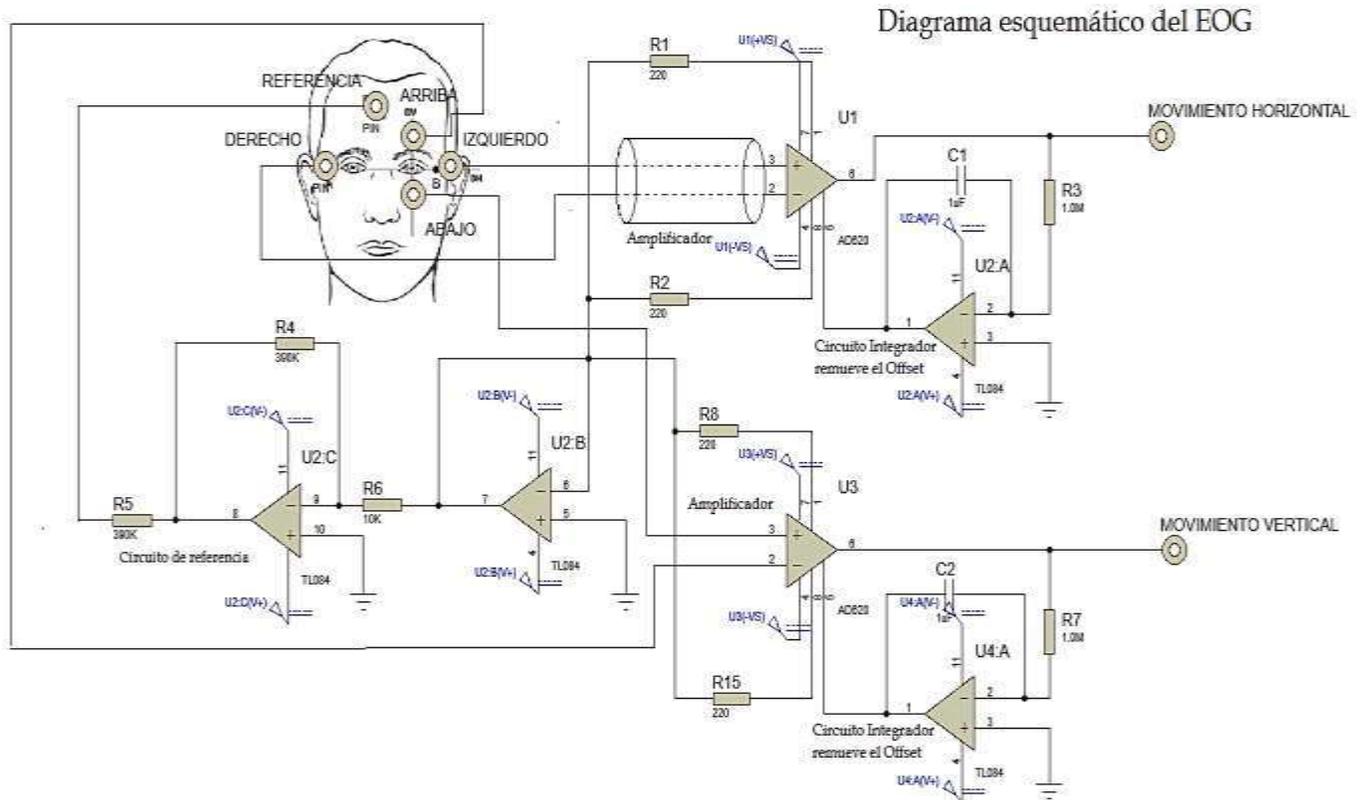


Figura 4. Diagrama esquemático de conexión del sistema de adquisición de EOG.

Módulo de Amplificación. En el sistema se utilizan dos módulos de amplificación, uno inicial de preamplificación que es el encargado de obtener la señal diferencial en las entradas y la multiplica por una ganancia de 100 con el objetivo de obtener un nivel de amplitud adecuado, ya que los potenciales bioeléctricos a nivel de la superficie corporal son del orden de micro voltios. El segundo módulo de amplificación va después del módulo de filtrado y tiene una ganancia de 50 con el objetivo de lograr el nivel de voltaje necesario para digitalizar la señal. Estos módulos utilizan un Amplificador de Instrumentación AD620, por su alta impedancia de entrada, baja impedancia de salida y un CMRR alto superior a 100 dB.

Corrector de basal: Al amplificador de instrumentación se le añadió un circuito corrector de basal de 0.1s para mantener la señal del potencial bioeléctrico del movimiento ocular obtenida, el modulo se implementa como un integrador que se conecta en forma de retroalimentación a las salidas Ref y V_{out} del AD620, como se observa en la Figura 5. Este módulo es de suma importancia, debido a que actúa como un filtro pasa alto que elimina el voltaje de polarización en corriente directa, evitando así que los amplificadores operacionales se saturen.

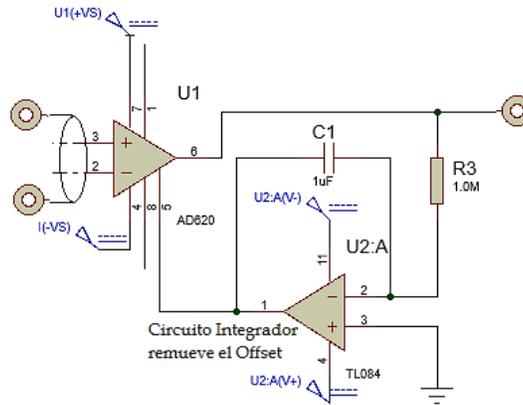


Figura 5. Amplificador de instrumentación en configuración con el corrector de basal instrumentado mediante un circuito integrador.

Módulo de Aislamiento: Este amplificador causa un aislamiento eléctrico físico entre la fuente de señal y el equipo energizado. Cuando no se puede conectar un sensor y un instrumento a la misma referencia de tierra, o cuando se requiere medir un voltaje sin referencia al aislamiento de tierra, se utiliza el circuito integrado ISO122 cuyo proceso de Modulación-Demodulación se realiza de forma digital.

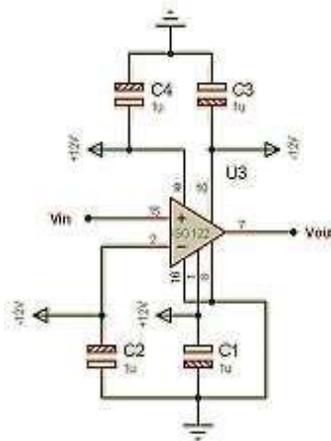


Figura 6. Circuito de aislamiento capacitivo ISO122.

Módulo de Filtrado: La señal amplificada debe ser filtrada para eliminar las componentes en frecuencia que la acompañan y que no son útiles. Se desarrolló un filtro pasa banda de segundo orden en configuración Butterworth, con una ganancia unitaria, con el fin de atenuar las señales que no están dentro del rango de 0.05 Hz a 50 Hz, con una relación de 40 dB por década. Se implementó con amplificadores operacionales de alta impedancia de entrada, resistencias de precisión y capacitores de tantalio para lograr que la respuesta del filtro sea lo más cercana a la ideal, este módulo se presenta en la Figura 7.

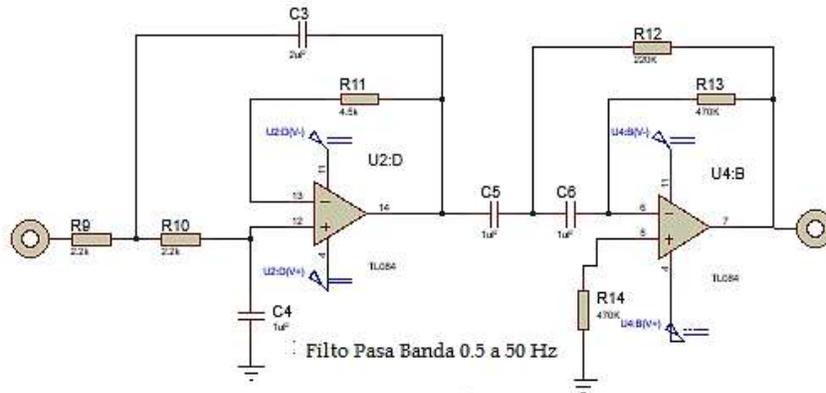


Figura 7. Modulo del filtro pasa banda configuración Butterworth de 40 dB por década.

Procesamiento Digital de la señal de EOG

La finalidad de esta etapa es lograr, a partir de la señal de EOG adquirida, la detección de umbrales de voltaje aplicando técnicas de procesamiento digital de señales a través de la transformada rápida de Fourier (FFT) y filtros digitales utilizando el software LabVIEW. La salida de la etapa de adquisición para cada canal de EOG se conecta a una entrada diferencial de voltaje de la tarjeta de adquisición DAQ6008, una vez filtradas digitalmente estas señales se obtienen umbrales de voltaje que serán pulsos en alto o bajo, estos datos digitales conforman tablas de verdad que activarán el cambio de transición de una máquina de estados cuyas salidas son comandos de control de posición de un robot de dos grados de libertad.

A continuación se presenta el diseño de los filtros digitales y la operación de la tabla de estados diseñada.

Diseño de Filtros Digitales

Esta etapa inicial con la digitalización de la señal de EOG a una frecuencia de muestreo de 250 Hz mediante la tarjeta DAQ6008, con una resolución de 12 bits, se utilizó la herramienta Express del módulo LabVIEW DAQ Assistant. En la Figura 8, se presenta la implementación de la digitalización de la señal en el software LabVIEW, luego de la lectura de la señal de EOG se implementó un filtro digital de quinto orden en la configuración de Butterworth, posteriormente se implementó la detección de picos positivos, para observar a través de un rango de datos la detección de un pulso que determina la orientación de la mirada. Con la implementación de este procesamiento digital se conoce con certeza la frecuencia del ruido que se induce a la señal, es así que se mejora el diseño de un filtro digital aplicando dicha frecuencia de corte.

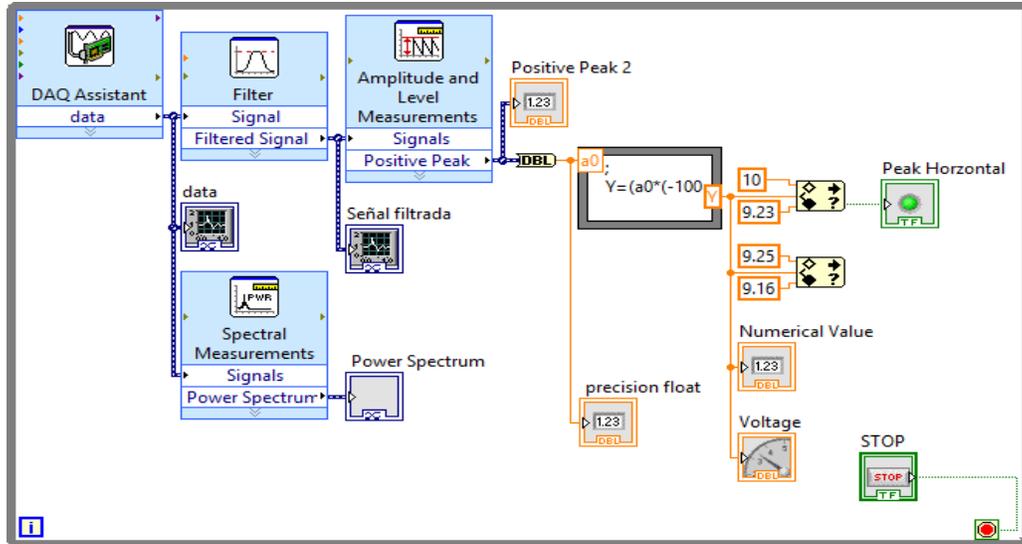


Figura 8. Instrumentación virtual en LabVIEW.

En general, para el diseño del filtro se definieron sus especificaciones, se evaluaron los factores de ganancia, frecuencias de corte y bandas de uso. Según las especificaciones, el filtro se dimensiona seleccionando el orden y el tipo de filtro, en este caso para disminuir el tiempo de procesamiento computacional del cálculo se seleccionó un filtro de quinto orden y la configuración elegida fue Butterworth. En la Figura 9 se obtiene el resultado de la señal de EOG con ruido inducido a 60 Hz sin aplicar filtros digitales, al aplicar FFT sobre la señal EOG se observa que precisamente es esta frecuencia la que sobresale de los demás valores, indicando la componente en frecuencia del ruido a filtrar. La frecuencia de corte del filtro pasa bajas con ganancia unitaria, según la respuesta del espectro en frecuencia de la señal de EOG aplicando FFT con la herramienta Signal Measurements de LabVIEW, fue de 60 Hz como se observa en la Figura 10.

La implementación del filtro en un algoritmo que realice la convolución discreta de la función de transferencia del filtro y la señal discreta de EOG, da como resultado la señal filtrada que se presenta en la Figura 11.

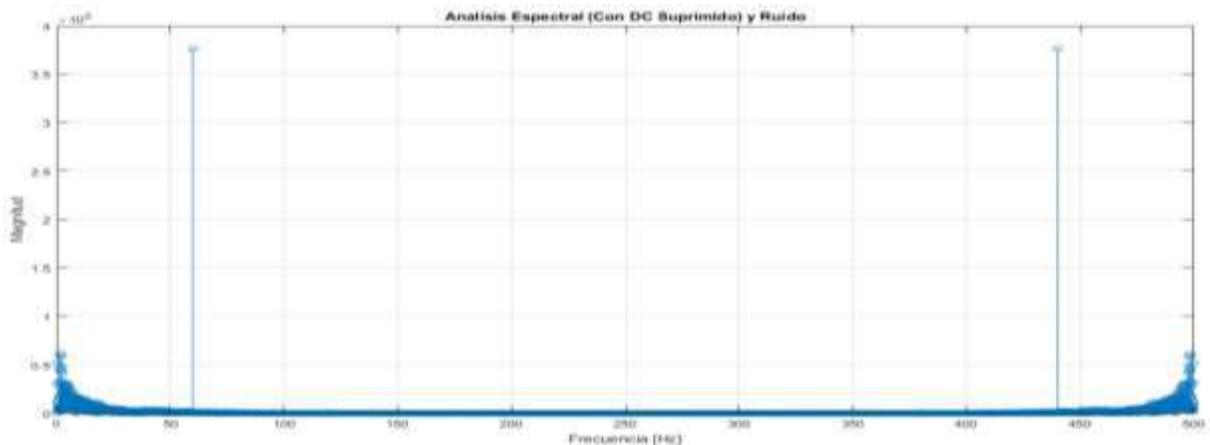


Figura 9. Espectro en frecuencia de la señal EOG indicando la componente en frecuencia para la posterior implementación de un filtro digital.

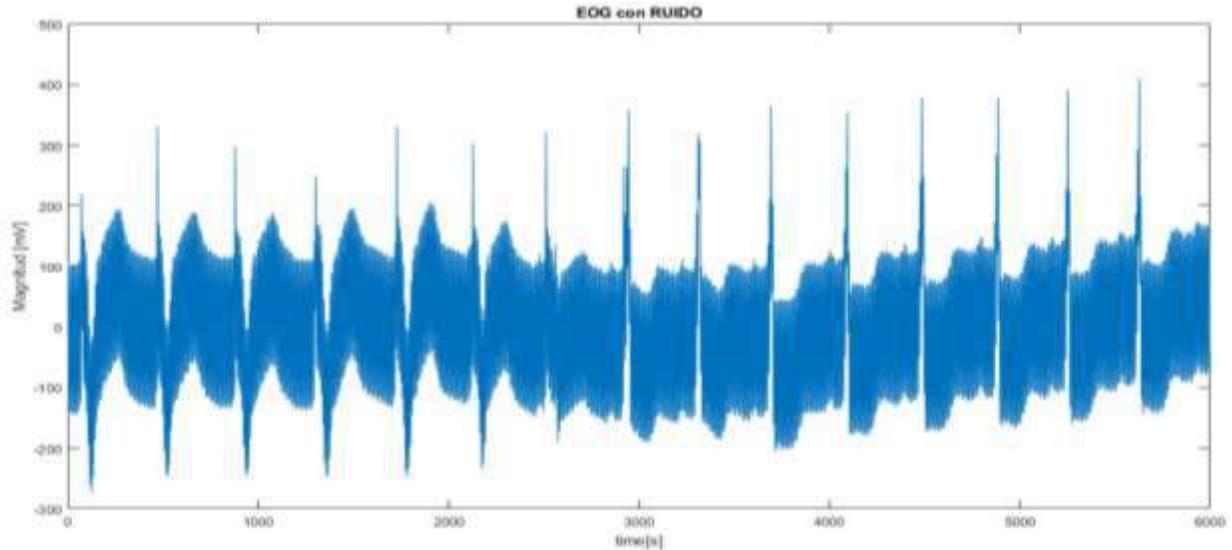


Figura 10. Señal de EOG con ruido de 60 Hz inducido.

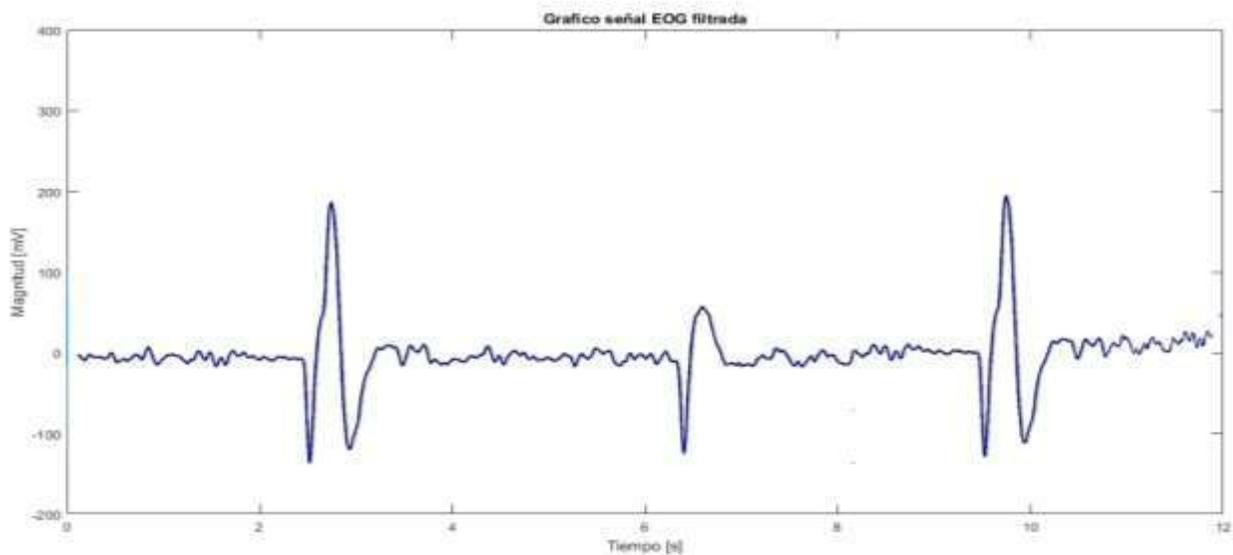


Figura 11. Señal de EOG con filtro digital de quinto orden en configuración Butterworth

Tras la implementación del filtro de la señal de EOG para cada canal, horizontal y vertical, se implementó la detección de pulsos positivos y negativos de dicha señal, y a través de umbrales de voltaje se digitalizaron estos pulsos, como se observa en la Figura 8, es decir si el valor de la amplitud se encuentra en rangos de voltaje predefinidos, se obtiene un pulso en alto (1 o High), si no es así se tiene un pulso bajo (0 o Low). Estas señales fueron utilizadas como entradas para la máquina de estados a partir de la cual se controla la posición de un robot virtual de dos GDL.



Máquina de Estados

Las señales digitales obtenidas del procesamiento de la señal EOG controlan la transición de un sistema digital por medio de tablas de verdad, se realizó el diseño de una máquina de estados que indica a cada grado de libertad del robot virtual, la dirección que debe tomar por cada uno de los movimientos registrados por la señal de EOG.

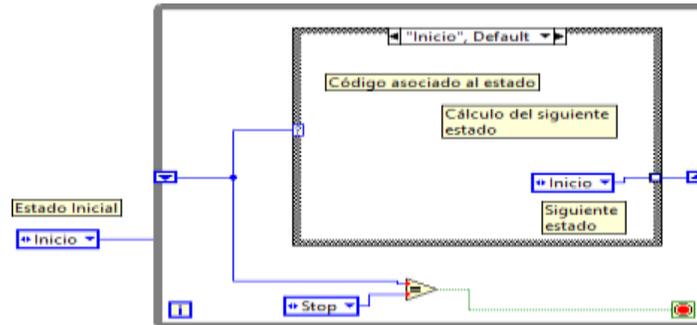


Figura 12. Plantilla para implementar transiciones de una máquina de estados configuración Mealy en LabVIEW.

Se implementó una máquina de Mealy, que genera una salida basándose en su estado actual y una entrada. Esto significa que el diagrama de estados incluye ambas señales, de entrada y salida, para cada línea de transición, como se observa en el diagrama de LabVIEW de la Figura 12.

En la implementación de la máquina de estados lo más importante fue definir apropiadamente sus estados, entradas posibles y salidas. De esta forma se tienen varios conjuntos finitos: el de estados, el de entradas y el de salidas. El siguiente paso fue realizar una tabla de transiciones o un diagrama de estados a partir de la descripción del problema que da lugar a la transición.

En la tabla de transiciones se describen las entradas digitales que requiere la máquina de estados para que sea posible un cambio de estado, se puede representar como bit menos significativo la entrada VAb (Vertical abajo), que representa la lectura de un pulso en alto o bajo, cuando la detección de un movimiento vertical del globo ocular con dirección hacia abajo es registrado o no, respectivamente. Lo mismo pasa para cada entrada del sistema, VA (Vertical Arriba) para la detección de un movimiento vertical del globo ocular con dirección hacia arriba, HD (Horizontal Derecha) para la detección de un movimiento horizontal del globo ocular con dirección hacia la derecha y por último HI (Horizontal Izquierda) para la detección de un movimiento horizontal del globo ocular con dirección hacia la izquierda, por lo que es una entrada con cuatro valores digitales. En la Figura 13 se observa la nomenclatura de las entradas de cada uno de los estados posibles del movimiento ocular, las direcciones marcadas por las flechas indican estados para las entradas HI, HD, VA, VAb.

En la Figura 14 se observa la máquina diseñada con los nueve estados posibles para el movimiento ocular, con cuatro entradas digitales correspondientes a los pulsos en alto y bajo provenientes de la señal EOG, para cada canal (horizontal y vertical).

Los estados de la máquina de Mealy se utilizan para controlar la posición de un robot de dos grados de libertad, cuando las entradas digitales a la máquina correspondiente a la tabla de verdad de la



Figura 13 son verdaderas, se cambia la posición del robot modificando la orientación de los eslabones, activando los motores 1 y 2 del modelo virtual que se implementó en la interfaz gráfica diseñada.

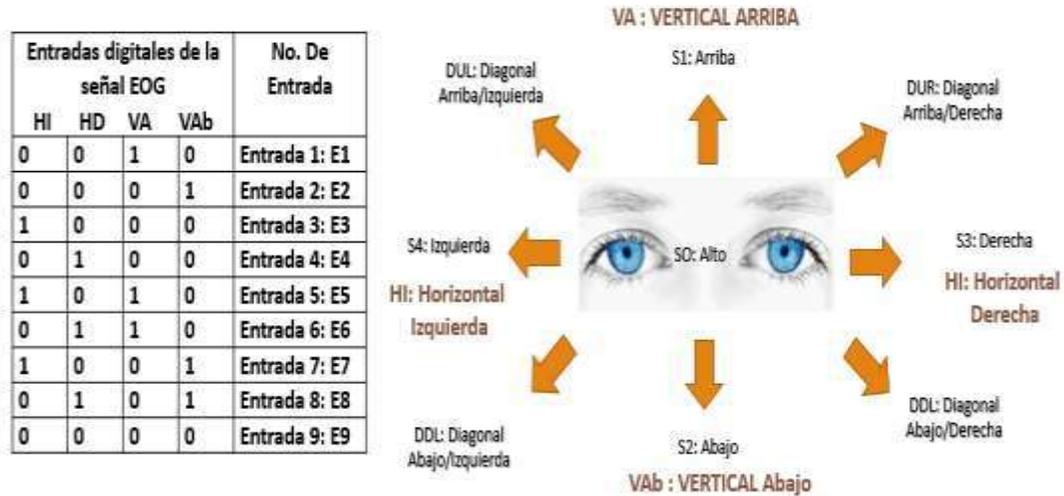


Figura 13. Nomenclatura de las entradas de la máquina de estados.

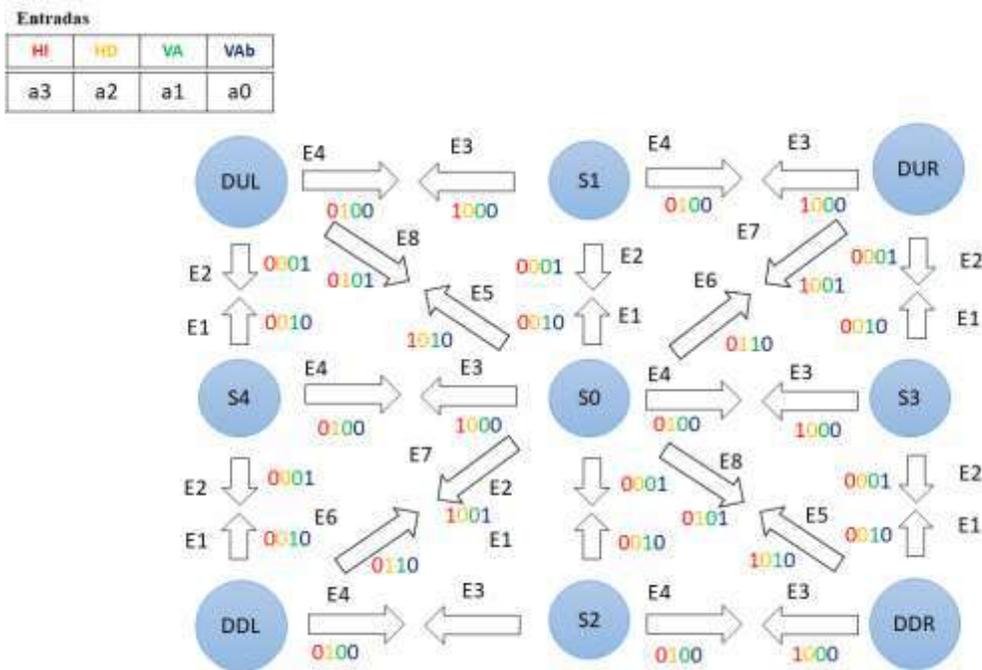


Figura 14. Máquina de Estados

Hasta este momento para realizar las pruebas de operación del sistema de adquisición de EOG y de la máquina de estados se han definido movimientos preestablecidos en los eslabones del robot para cada estado, los cuales se presentan en la Tabla 1.



Tabla 1. Movimientos preestablecidos para posicionar el robot virtual para cada estado

Estado	Motor 1 (grados)	Motor 2 (grados)
S0	90°	90°
S1	90°	150°
S2	90°	30°
S3	60°	90°
S4	150°	90°
DUL	150°	150°
DUR	60°	150°
DDL	150°	30°
DDR	60°	30°

Resultados y discusión

Para evaluar el desarrollo de la interfaz hombre-máquina diseñada, se implementó la interfaz gráfica de usuario que se observa en la Figura 15. Desde esta interfaz se indica cuando inicia la adquisición de ambos canales de EOG, horizontal y vertical, se observa la acción del filtro digital de quinto orden configuración Butterworth implementado para cada canal, y el resultado de la detección de umbrales de voltaje que permiten generar las entradas digitales que controlan la máquina de estados, (HI, HD, VA, VAb). Al activarse cada estado un led indicador dentro de la interfaz permite visualizar que estado fue y corroborar que el robot efectivamente se posiciona de forma predefinida. Adicionalmente, la interfaz permite la visualización en tiempo real del usuario, útil para la visualización del movimiento ocular con el objetivo de evaluar la sincronización del movimiento ocular con el cambio de posición del modelo virtual de robot de dos grados de libertad tipo revoluta-revoluta implementado.

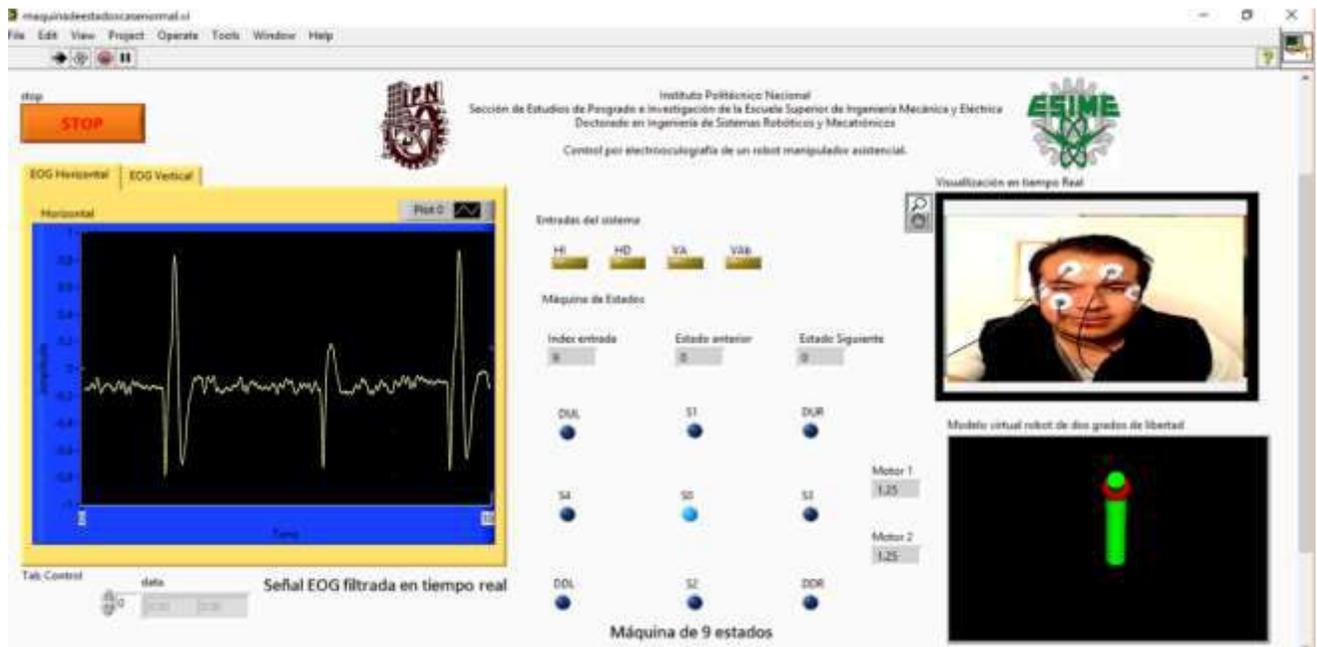


Figura 15. Interfaz gráfica diseñada en LabVIEW.



En esta etapa del proyecto no se han establecido trayectorias específicas para el robot, inicialmente se verifica que el movimiento ocular permita el cambio de posición del robot de acuerdo a la máquina de estados y a los datos programados en la Tabla 1, como se observa en la Figura 16.

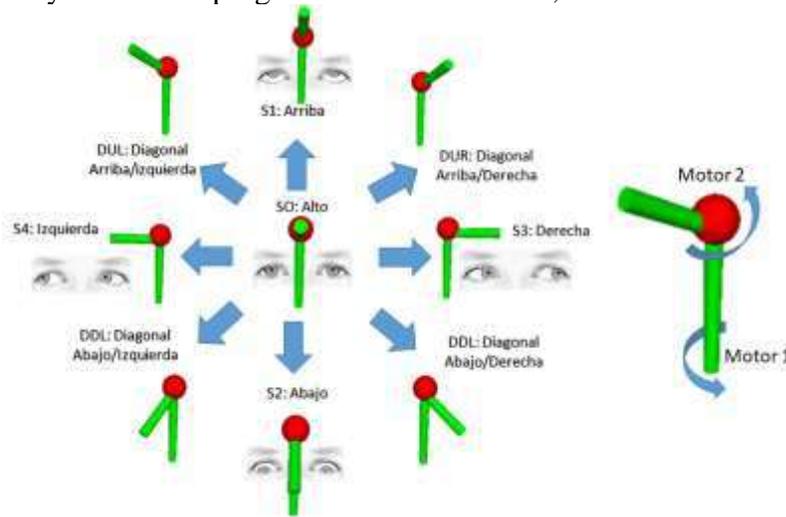


Figura 16. Movimientos del robot virtual correspondientes a la orientación ocular.

El desarrollo del proyecto tiene como objetivo la implementación de una interfaz hombre-máquina utilizando una señal de EOG, la importancia de los resultados radica en el tratamiento digital de las señales fisiológicas en tiempo real y la implementación de una máquina de nueve estados para controlar los comandos de movimiento básicos de un robot de dos grados de libertad virtual. En este momento se está trabajando en el desarrollo de un algoritmo que permita obtener los umbrales de voltaje de forma óptima para la correcta digitalización de los valores máximos y mínimos de cada canal e implementar algoritmos de control para el seguimiento de trayectoria para un robot físico de dos grados de libertad.

Referencias

- [1] M. Mazo et al., “An integral system for assisted mobility”, IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 8, No. 1, Mar 2001, p. 46-56.
- [2] J.C. García, M. Mazo, L.M. Bergasa, J. Ureña, J.L. Lazaro, M. Escudero, M. Marron, E, Sebastian: “Human-Machine Interfaces and Sensory Systems for an Autonomous Wheelchair”, Proceedings of the AAATE'99 conference. IOS Press, Assistive Technology Research Series, Vol. 6, p. 272-277.
- [3] P.B. Taylor, H.T. Nguyen, “Performance of a head-movement interface for wheelchair control”, Engineering in Medicine and Biology Society, 2003. Proceedings of the 25th Annual International Conference of the IEEE, Vol.2, 17-21 Sept. 2003, p. 1590-1593.
- [4] D. Gareth Evans, Roger Drew, and Paul Blenkhorn, “Controlling Mouse Pointer Position Using an Infrared Head-Operated Joystick”, IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, vol. 8, no. 1, March 2000, p. 107-117.



[5] L.M. Bergasa, M. Mazo, A. Gardel, R. Berea, L. Boquete: “Commands Generation by Face Movements Applied to the Guidance of a Wheelchair for Handicapped People”, Pattern Recognition, 2000. Proceedings 15th International Conference on, p. 660-663 vol.4.

[6] Andrés Úbeda, Eduardo Iáñez, and José M. Azorín: “Interface based on electrooculography for velocity control of a robot arm”, Expert Systems with Applications 37 (2010) 3337-3343.

[7] Andrés Úbeda, Eduardo Iáñez, and José M. Azorín: “Wireless and Portable EOG-Based Interface for Assisting Disabled People”, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 16, No. 5, october 2011.

[8] Youngmin Kim, Nakju Lett Doh, Youngil Youm & Wan Kyun Chung: “Robust Discrimination Method of the Electrooculogram Signals for Human-Computer Interaction”, Controlling Mobile Robot, Intelligent Automation & Soft Computing, Vol. 13 (3), pp. 319-336, 2007

[9] Rafael Barea, Luciano Boquete, Manuel Mazo, Elena López, L.M. Bergasa. (2008). “Electrooculographic guidance of a wheelchair using eye movements codification”, de Campus Universitario Alcalá de Henares. Madrid. Spain, Website: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.137.6618&rep=rep1&type=pdf>

[10] Bartual J, Pérez N. El sistema vestibular y sus alteraciones. Masson, Barcelona, 1998.

[11] Singh, H. & Singh, J. A review on electrooculography. International Journal of Advanced Engineering Technology, Vol. 3(4), pp.112-122, 2012.

[12] Brown, M., Marmor, M., Vaegan, Zrenner, E., Brigell, M. & Bach, M. ISCEV Standard for Clinical Electro-oculography EOG. Documenta Ophthalmologica, Vol. 113 (3), pp. 205–212, 2006.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional (México) por su apoyo a través de la Escuela Superior de Ingeniería Eléctrica unidad Azcapotzalco. F. David Pérez-Reynoso agradece a CONACYT (México) y a la Universidad Militar Nueva Granada (Colombia) grupo de investigación Davinci por su apoyo en la estancia de investigación en el desarrollo de este proyecto.



A Short Review on Engineering Education: A Focus on Machine Design Educational Practices

Una Revisión Corta sobre la Educación en Ingeniería: Un Enfoque a las Prácticas Educativas sobre el Diseño de Máquinas

Carlos A. Romero Piedrahita¹, Libardo V. Vanegas Useche^{2, γ}, Miguel Díaz Rodríguez³

1. Facultad de Tecnología, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia

2. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia

3. Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela

γ. Autor correspondiente: lvanegas@utp.edu.co

Abstract

Nowadays students entering mechanical technology programmes lack the background and interest in mechanical design, whereas they are keen on computers, cell phone applications, and video games. Another difficulty is the diversity of students' learning styles. Taken into account these and many other problems, the faculty staff of the Mechanical Technology Programme at the Technological University of Pereira have carried out a literature review on engineering educational practices and, in particular, machine design education. This review was necessary for proposing a reformed approach to the teaching practice of the Machine Design course of the Mechanical Technology Programme. The aim of this paper is to present this literature review, as well as to discuss the elements and importance of this course. From the literature reviewed, a trend towards lecturing less is perceived; this, in order to make learning environments more practical and interactive, to integrate technology into the learning experience, and to use collaborative learning strategies when appropriate. It is argued that lecturing minimizes feedback from students, assumes an unrealistic level of student understanding and comprehension, and often disengages students from the learning process causing information to be quickly forgotten.

Keywords: machine design, engineering education, literature review, curriculum.

Resumen

Actualmente, los estudiantes que ingresan a los programas de tecnología mecánica carecen de interés en el diseño mecánico, mientras que están interesados en las computadoras, celulares y videojuegos. Otra dificultad es su diversidad de estilos de aprendizaje. Teniendo en cuenta estos y otros problemas, los docentes del Programa de Tecnología Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira han llevado a cabo una revisión de la literatura sobre la enseñanza de la ingeniería y del diseño de máquinas. Esta revisión fue necesaria para reformar las prácticas pedagógicas del curso de Diseño de Máquinas. El objetivo de este trabajo es presentar dicha revisión y discutir los elementos y la importancia de dicho curso. De la revisión, se percibe una tendencia a dictar menos clases; esto, para hacer que los entornos de aprendizaje sean más prácticos e interactivos, para integrar la tecnología en la experiencia de aprendizaje y para utilizar estrategias de aprendizaje colaborativo cuando sea adecuado. Se argumenta que las clases magistrales minimizan la retroalimentación de los estudiantes, asumen un nivel poco realista de la comprensión por parte de los estudiantes y, a veces, desvinculan a los estudiantes del proceso de aprendizaje, lo que hace que la información se olvide rápidamente.



Palabras clave: diseño de máquinas, educación en ingeniería, revisión de literatura, currículo.

Introduction

Today, educators teach a digital and wired generation of students, who use technology that is constantly evolving. Curricula evolve, and new teaching methodologies, which could take advantage of the Internet of Things and YouTube virtual resources, are needed to influence new generations of students, for whom learning must be clearly relevant. Course content must be specific, concise, and fast, and practical applications of the information they receive must be manifest. It is apparent that students do not feel they need to learn everything immediately. Along with academic education and practical skills, at least a minimum content of communication, creative, interpersonal, and technical skills must be taught to the students.

So far, students of the Machine Design course of the Mechanical Technology Programme at the Technological University of Pereira are instructed to combine engineering theory and practice in the development of general purpose mechanical parts and assemblies that are commonplace in transport and material handling equipment. Students are expected to obtain skills and basic knowledge in engineering science and technology, including computer-assisted drawing and manufacturing (CAD/CAM), as used in industry.

However, the faculty members of the Mechanical Technology Programme have agreed that a pedagogical reform of the Machine Design course was needed. The curriculum had to be modified, so that the learning outcomes are achieved effectively. The students should become more independent learners, not only acquiring knowledge about what they know but also making them aware of what they do not know. The new pedagogical approach should involve the students in an industrial environment, seeking the analytical-thinking, team-building, multitasking, and problem-solving skills, learning and mastering in the hands-on works. Also, project based teaching of machine design is expected to enhance the learning possibilities.

Some of the core characteristics of the reform carried out are:

- *Well-defined* learning outcomes (competencies) of the courses and the means to obtain them.
- *Extension of software and spreadsheet systematization*, where possible. The use of spreadsheets in Excel allows students to perform design procedures and analyses of different solutions over and over. Multiple ways to solve an open ended problem may be available, and students can try repeatedly until they feel satisfied with the solution.
- *Team play*, networked online activities give students opportunities to work together, sharing interests, collaborating, and evaluating the activities in groups.
- Pedagogical activities consists of lectures, hands-on experience, labs, class discussions, workshops, visits to workshops and industries, small scale projects, homework, and examinations, allowing students to find themselves involved in the process and track their progression toward their qualification. Lecturers are advised to suggest links to videos as a support to the courses, so that students have a better view of the subjects studied and their practical applications. Measures are taken to make students understand, in the classroom, where they are on the pathway toward their goal.

In order to carry out the reform, a literature review of machine design curricula and pedagogical engineering practices was performed and it is presented here. This paper is organized as follows: in the first part, the importance of machine design in Mechanical Technology curriculum is



discussed. Then the organization of the Machine Design course is presented. The fourth section presents the pedagogical strategies reviewed. In the last part, the main conclusions are provided. It is noted that, for space restrictions, the reform performed is presented in [1].

The importance of machine design in a Mechanical Technology curriculum

The Mechanical Technology Programme at the Technological University of Pereira in Colombia is a three year undergraduate programme, accredited by the National Accreditation Council, an office responsible for conducting the assessment of high quality accreditation of institutions or programmes that volunteer to undergo this process. As the complexity of the technology increases and the body of engineering knowledge becomes more codified, technological education is more readily accepted as an integral part of the university mission. Educating mechanical technology students to be virtuous designers is a common desire of industry and ABET.

In the Mechanical Technology Programme, students study the foundations of mechanics, materials, applied thermofluids, energy, and manufacturing processes, which are science or technology based subjects with a relatively clear focus on technological knowledge. The Machine Design course encompasses a broad range of topics applied to the conception, development, and implementation of a final design project in one of the fields of material or energy processing or transport; it has to do with different perspectives (designers, technicians, users) from different engineering fields and disciplines (product and machine design, power generation, energy conversion, and manufacturing) of mechanical engineering technology.

In general, machine design can be described as the application of mathematics, physics, kinematics, statics, dynamics, mechanics of materials, engineering materials, technology of metals, and engineering graphics in the conception, construction, use, maintenance, and recovery of machines that generate, transform, and utilize mechanical energy. It involves application of other subjects like hydraulics, thermodynamics, thermal engines, electricity, manufacturing processes, compressors, pumps, etc.

In accordance with the mission of the UTP [2], mechanical technologists are qualified to provide technical support and services or may work independently in mechanical engineering fields such as the *design*, development, maintenance, and testing of machines, components, tools, heating and ventilating systems, power generation and power conversion plants, and manufacturing plants and equipment. They are employed by consulting engineering, manufacturing, and processing companies, institutions, and government departments. Some of the would-be occupations are maintenance technologist, machine designer, mould designer, thermal station technologist, and tool and die designer.

Mechanical technologists perform some or all of the following duties:

- Prepare and interpret conventional and computer-assisted design (CAD), *engineering designs*, drawings, and specifications for machines and components, power transmission systems, process piping, heating, and ventilating and air-conditioning systems.
- Conduct tests and analyses of machines, components, and materials to determine their performance, strength, response to stress, and other characteristics.
- Design moulds, tools, dies, jigs, and fixtures for use in manufacturing processes.
- Inspect mechanical installations.



- Prepare protocols and schedules and supervise mechanical maintenance programmes or operations of mechanical plants.

Machine Design is a fulcrum course in the Mechanical Technology Programme. This course examines structured engineering design theory and methodologies for conceptual design and redesign of products, enabling technologists to solve complex and multidisciplinary problems. The course underpins the strong conceptual thinking and the practical knowledge of machines and how they work, conveying the knowledge acquired in other areas of the programme such as thermodynamics, hydraulics, thermal and hydraulic systems, metalworking and transport machines, and mechatronic systems. Machine design theory enables lifelong learners with the ability to adapt, grow, and succeed in a highly competitive world of complex material processing, manufacturing, transportation, and power generating machines and industries.

Additionally, design is recognized as the primary contributor to the final product form, cost, reliability, and market acceptance. The design and analysis process is particularly important since the majority of the life-cycle costs, including diagnostics and maintenance, and overall quality of any system, irrespective of its field of application, is determined during this phase. The major opportunities for cost savings occur in the earliest phases of a product design. Approximately seventy per cent of the life-cycle costs are frozen by the end of the conceptual design phase [3].

It is necessary to add that the ABET criteria [4] require that the students graduating from an engineering technology programme demonstrate “an ability to apply creativity in the design of systems, components, or processes appropriate to the programme objectives.” Design by its nature is broad in scope and draws on creative talents, management skills, and knowledge of those involved.

Machine Design course syllabus

Understanding that it will never be possible to teach university students everything they will need to know for their professional life, the Mechanical Technology Programme pursues to provide a core set of science, technological, engineering, and social fundamentals to help students integrate knowledge across courses and disciplines, and articulate the knowledge, lifelong learning skills, and habits of mind that are needed to perform professionally and satisfactorily in an interdependent world.

The Machine Design course structure is hinged on the application of engineering design process and knowledge integration, from prior courses and manufacturing courses.

The course integrates the knowledge of Statics, Dynamics, Strength of Materials, and Engineering Materials into the design process of machine elements. Students learn the fundamentals of the design process, the design criteria of common general purpose mechanical components, the design of some common machine elements, and mechanical element selection from catalogues. The students apply concepts of strength of materials to determine the stress, strain, and deflection of structures; learn fundamental approaches to failure prevention for combined static, sudden, and repeated loading; apply the concepts of geometrical and dimensional tolerances; consider the design and selection approaches of common machine elements such as columns, fasteners, press fits, springs, bearings, shafts, couplings, as well as belt, chain, and gear transmissions; solve an open-ended design problem involving structural analysis, drawings, production and interchangeability issues. The course must familiarize students with structured procedures, ways of thinking, and judgmental skills, referred to as



“knowing how”, to seek design solutions and make design decisions. The course must contribute to the development of communication skills and teamwork. Students must be stimulated to attain system design and systems thinking skills.

Conventional pedagogies applied in machine design teaching practice are supplemented with apparatus dissection, laboratory works, and course project. The project is assigned over one semester and requires hand calculations, placing special emphasis on documentation (fully annotated and dimensioned general assembly and detail drawings) and report writing. Tutorials and self-study examples are recommended to students.

Conventional manual calculation methods systematized in spreadsheets are required for component stress, stiffness, fatigue life, stability, vibration, and wear analysis. Safe life requirements must encompass machine operational regimes and life service period. Thinking of manufacturing and assembly, precision tolerances are required for components and assembly modules like actuator cylinders and synchronizers.

Desirable habits in student’s mind that reflect the notion of convergent-divergent thinking should be: the ability to recognize systems context, reasoning about uncertainty, making estimates, and performing experiments.

Regarding the above course content and objectives, the question to ask is: how to best convey to the students the required course content and how to take advantage of the new pedagogical approaches and tools available to improve the efficiency of the teaching process? The pedagogical goal is to teach the covered material to interest and motivate the students, with the expectation of long term retention and connection to the fundamental concepts.

Pedagogical strategies for engineering and machine design teaching

To study the new pedagogical models for teaching machine design and to construct a pedagogical framework for the course of Machine Design in the Mechanical Technology Programme, its lecturers have reviewed a wide range of literature on design education. During the review, an effort was made to answer some core questions:

1. What are the trends in the teaching of mechanical design in technology education?
2. What methods, tools, and frameworks are being integrated into engineering education to enhance the flexibility and opportunities for interaction and student engagement in the learning process?
3. Is active learning effective in teaching mechanical design according to existing engineering education research?
4. What are the benefits and challenges of multi-media teaching, e-tools, and supplemental learning activities in enabling students to better achieve learning objectives?

Several findings and conclusions emerged as a result of the literature review on teaching practices in engineering education, in general, and in machine design learning, in particular, as referred in the following paragraphs.

For many authors [5-6], traditional classroom learning is very passive, with the professor lecturing and the students listening. In contrast, it is proposed that students in active learning scenarios solve problems, answer rhetorical questions, have hands-on activities, present solutions, apply their knowledge, brainstorm, debate, and create [7]. Similarly, combinations of the outcome based learning and project based learning approaches, to make students and teachers get



involved into the course, are regularly implemented in engineering and technological education [8].

Also, the presence of a physical object during the design process helps in enhancing design thinking and communication. Physical objects can be appreciated by at least two of the human senses and their behaviour and limitations can be better understood with its presence, permitting the user to make connections between objects and also to recall episodes of the component in usage. Learning in informal settings, such as museums and industry facilities can enrich the learning process by adding questions and knowledge from the classroom. These connected experiences spark further interest and motivation to learn [9-12].

With the aim of obtaining a rational, complete, consistent, and generalizable set of goals for undergraduate engineering education, an international collaboration network has been created: the CDIO Initiative (Conceive, Design, Implement, and Operate), a framework for development of engineering Education. The CDIO approach states that “the product, process, or system lifecycle should be the context, but not the content, of engineering education”. The CDIO initiative is centred in active experiential learning through lectures and workshop laboratories, with the execution of student projects complemented by internships in industry. This initiative has been practiced by many institutions as reported in some published works [13-15].

The understanding that current technological and engineering education has deficiencies in the design component has pushed ABET [4] to prompt increased emphasis on design, explicitly stating that the engineering design component of a curriculum must contemplate development of student creativity, use of open-ended problems, development and use of design methodology, inclusion of realistic constraints, such as economic factors, safety, reliability, aesthetics, ethics, and social impact. Regarding creativity, Lewis *et al.* [16] suggest that problem finding has been a missing dimension of the design and problem-solving literature. They state that the function of thinking is not just solving an actual problem, but discovering, envisaging, and dealing with deeper questions.

Many articles [6,16-19] deal with the experiences and methods of teaching machine design. Wood *et al.* [6] address their approach for teaching design methods that incorporate hands-on experiences through the use of “reverse-engineering” projects. Also, with the aim of attaining the goals of the Machine Design course, frameworks that consider the relevance of active experiential learning through lectures and laboratories, with the execution of student projects complemented by project based learning, are being conceived. It is also stated that a Machine Design course must be taught in such a manner that not only does it explore the fundamentals of the behaviour of machine components and power transmissions, but also it imparts practical tools for designing, manufacturing, and building mechanical systems and instruments [20-22].

There is a wealth of information from manufacturers, professional and trade organizations, suppliers of products, and many government agencies, which is available to the students to enhance their learning process of machine design [23]. Among these resources, technical handbooks, electronic catalogues, and design repositories facilitate the representation, capture, sharing, and reuse of design knowledge. Industry’s web sites, containing technical data, industrial applications, selection procedures, interactive examples, animations, and videos, are suggested to the students, as a means to reinforce and extend the concepts studied in the lectures [24-28].

In industry, the development of information and communication technologies has made it possible the distributed collaborative design, supported by cloud computing with the transmission



of knowledge between remote sites. This context prompts the corresponding approaches in educational environments, trying to introduce tools to support collaborative work among students, preparing them to the so-called concurrent engineering approach. A review of literature related to computer-supported collaboration tools to support creative processes within design groups was conducted by Venkataswamy *et al.* [29]. Based on the results of the review, the authors derived a set of design implications focused on assisting creative processes for design teams. Maldonado *et al.* [30] have reported the results of a study on longer-term collaborations among students engaged in creative, open-ended projects.

Also, lecturers must be aware that we live in a digital era; particularly, the Internet plays an important role in education. Faculty are already feeling the pressure to lecture less, to make learning environments more interactive, to integrate technology into the learning experience, and to use collaborative learning strategies when appropriate [31]. File exchange is a great way to share ideas and stimulate new thoughts outside meetings and allows design teams to efficiently cooperate and communicate. On-line learning is being implemented to exploit the availability of web based open educational resources. Massive open online courses began to generate new digital resources, and illustrate new ways of designing online learning. Internet delivery can also include intelligent tutoring systems and remote laboratories [32]. As an example, Wood *et al.* [33, 34] have incorporated the interactive multimedia courseware with workout problems, Visual Mechanics of Materials (Vis-MoM), into the machine design curriculum, to provide the students with the opportunity to review the fundamentals of Mechanics of Materials. This courseware is a supplement to the main course taken by the students, and it is designed purposely as an off-line aid.

An interesting learning strategy consists of game scenarios designed by computer specialists, mechanical engineers, and didactics experts, in which important pedagogical attributes, such as action and emotion, combine. An example of the implementation of learning game application is Mecagenius, described by Pons-Lelardeuxa *et al.* [35]. Likewise, social networking sites such as Facebook, Twitter, and YouTube have been integrated into daily life for many students. Interactivity is a *Must*; the power of learning and making meaning at the interactive, conversational level is already well recognized. Electronic mail is used as a useful way to promote student-student or faculty-student communication between class meetings, to extend topic discussions, and to explore critical issues with students and colleagues [36].

Also, Web 2.0 technologies, such as wikis, weblogs, and social networking sites are beginning to be used in collaborative learning design, enhancing active learning and excitement in the students, by recreating experiences that mirror their real-life scenarios, as Chen at Stanford University has stated. Wikis and semantic wikis, based upon Web 2.0 [37], enhance distant collaborative interaction, support the exchange of knowledge, and allow members of a student group to collectively work on a project from nearly any computer with an Internet connection. Walthall *et al.* [38] present a thorough overview of the potential uses of wikis for engineering design process. They evidenced that a wiki environment is an effective collaboration tool in early design processes, more broadly useful for collaboration and documentation.

Machine design related videos and podcasts, available on the Internet, can be suggested to the students as a flexible method to enhance learning. They offer the opportunity to replay and review lectures, as well as to share among the students and groups exercises, experiences, insights, templates, tools, and best practices. Devices such as smartphones and tablets can also be used for advanced tasks: graphing, equation solving, and symbolic manipulation are some of the



capabilities available in handheld devices. However, debates continue over what students will be asked to do and what can be off-loaded onto computational technologies [39].

Moreover, simulation, being an active learning method, can be considered a third way to obtain knowledge along with theory and experimentation. It has become omnipresent in engineering education. Knowledge based engineering (KBE) concepts and tools are playing an important role in reducing development cycle times. Product design and manufacturing organizations are moving from the traditional, multiple and serial design-build-test cycle approach to simulation-led problem solving and performance validation using CAE and CAD tools [40].

One of the important factors that determine the possibility and success of such paradigm shift is the availability of qualified virtual engineers. The lack of qualified virtual engineers is becoming an increasingly acute problem that prevents engineering companies from moving towards simulation-led product design. Students must be equipped with the knowledge of virtual prototyping processes and related mechanical engineering subjects, the ability of updating their own knowledge, and the experience of industrial applications so that they can take up the role of virtual engineers and technologists in industry after completing the course [41-42]. Thus, engineering courses in higher education should be the vehicles to supply future engineers with suitable knowledge, skills, and experience [43].

Furthermore, with remote laboratories and the Internet of Things, students can use a computer to observe and manipulate objects and systems that are located in other distant laboratory. In addition, a modification of remote laboratories is augmented reality, which combines real content with computer integrated virtual content [44].

Conclusions

This paper discussed the importance of machine design education and presented a literature review of engineering and machine design educational practices, in order to carry out a reform to improve the learning outcomes of the Machine Design course in the Mechanical Technology Programme at the Technological University of Pereira. It is recognised that design is an important part of the engineering curriculum and that combined design pedagogies must be used, with design fundamentals integrated across courses, semesters, and extra-curricular activities.

From the literature reviewed, it is concluded that there is a trend towards lecturing less. The arguments of this are that lecturing minimizes feedback from students, assumes an unrealistic level of student understanding and comprehension, and often disengages students from the learning process causing information to be rapidly forgotten. The curriculum should use active learning methodologies and create more interactive environments, which enable the interactions among students and between the lecturer and the students. Technology should be integrated into the learning experience. Also, collaborative learning strategies should be used when appropriate.

Design experiences may be conveyed to students through course project and small scale projects, in a project-driven approach (project based learning), procuring to simulate design, manufacturing, assembly, and operating processes, making the emphasis on team work, communication, creativity, ingenuity, and computer aided design tools. Also, laboratory work, dissection work, industrial visits, and field trips are useful manners to improve learning and acquire the required competences.



References

- [1] C. A. Romero-Piedrahita, L. V. Vanegas-Useche, and M. Díaz-Rodríguez, “Pedagogical strategies for enhancing machine design teaching in a mechanical technology programme,” in Proceedings of the IV Congreso Internacional sobre Tecnologías Avanzadas de Mecatrónica, Diseño y Manufactura AMDM 2018, accepted for publication, 2018.
- [2] “Proyecto Educativo Institucional”, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira [Online]. Available: <http://www.utp.edu.co/institucional/mision-y-vision.html>.
- [3] D. E. Calkins, “Knowledge-Based Engineering (KBE) design methodology at the undergraduate and graduate levels,” International Journal of Engineering Education, vol. 16, no. 1, pp. 21-38, 2000.
- [4] ABET, “Criteria for Accrediting Engineering Programs: Effective for Evaluations During the 2000-2001 Accreditation Cycle”, Accreditation Board of Engineering and Technology, 2000.
- [5] A. J. Duston, R. H. Todd, S. P. Magleby, and C. D. Sorensen, “A review of literature on teaching engineering design through project-oriented capstone courses,” Journal of Engineering Education, vol. 86, no. 1, January 2013.
- [6] K. Wood, D. Jensen, J. Bezdek, and K. N. Otto, “Reverse engineering and redesign: courses.”
- [7] W. G. Spady. (1994). Outcome-based education - critical issues and answers, American Association of School Administrators [Online]. Available: <http://files.eric.ed.gov/fulltext/ED380910.pdf>.
- [8] V. K. Meti, A. C. Giriapur, I. G. Siddhalingeswar, and P. A. Sadalagi, “Systematic approach to teaching and learning machine design course,” Journal of Engineering Education Transformations, Special Issue, 2016.
- [9] C. L. Dym, “Design, systems, and engineering education,” International Journal of Engineering Education, vol. 20, no. 3, pp. 305-312, 2004.
- [10] C. L. Dym, et al., “Engineering design thinking, teaching, and learning,” Journal of Engineering Education, vol. 94, no. 1, pp. 103-120, 2005.
- [11] Engineering the future: science, technology and the engineering design process. Boston, MA: Museum of Science, 2008 [Online]. Available: www.mos.org/etf/.
- [12] S. Ugurlu and D. Gerhard, “Integrative product creation – results from a new course in a learning factory,” in International Conference on Engineering and Product Design Education 4 & 5 September 2014, University of Twente, The Netherlands.
- [13] J. Malmqvist, et al., “Lessons learned from design build-test-based project courses,” in International Design Conference - Design 2004, 2004 [Online]. Available: www.cdio.org/papers/lessonslrnd_db.pdf.
- [14] E. F. Crawley, “The CDIO syllabus – a statement of goals for engineering education,” Massachusetts Institute of Technology, Department of Aeronautics and Astronautics, Cambridge, Massachusetts, USA, 2001.
- [15] J. Bankel, K. Berggren, M. Engstrom, I. Wiklund, E. F. Crawley, D. H. Soderholm, K. E. Gaidi, and S. Ostlund, “Benchmarking engineering curricula with the CDIO syllabus,” International Journal of Engineering Education, vol. 21, no. 1, pp. 121-133, 2005.



- [16] T. Lewis, S. Petrina, and A. M. Hill, "Problem-posing-adding a creative increment to technological problem solving," *Journal of Industrial Education*, vol. 36, no. 1, pp. 5-35, 1997.
- [17] J. W. Thomas. (2000). A review of research on project-based-learning [Online]. Available: <http://www.autodesk.com/foundation/pbl/research>.
- [18] R. M. Goff and J. P. Terpeny, "Engineering design education - core competencies," in *Industrial and Manufacturing Systems Engineering Conference*, 2012, Paper 11.
- [19] B. C. Fabien and K. L. Vereen, "Implementing a freshman engineering design experience at the University of Washington," in *3rd International Conference on Higher Education Advances, HEAd'17 Universitat Politècnica de València, València*, 2017.
- [20] J. S. Lamancusa, J. E. Jorgensen, and J. L. Zayas-Castro, "The learning factory: a new approach to integrating design and manufacturing into the engineering curriculum," *Journal of Engineering Education*, vol. 86, no. 2, pp. 103-112, 1997.
- [21] T. W. Simpson, et al., "A new course for integrating design, manufacturing and production into the engineering curriculum," *International Journal of Engineering Education*, vol. 20, no. 5, pp. 764-776, 2004.
- [22] J. H. McMasters, "Influencing student learning: an industry perspective," *International Journal of Engineering Education*, vol. 22, no. 3, pp. 447-459, 2006.
- [23] G. Youssef and J. M. Cabo, "Machine design: redesigned," in *122nd ASEE Annual Conference and Exposition*, Seattle, 2015.
- [24] S. R. Hall, et al., "Adoption of active learning in a lecture-based engineering class," in *32nd ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference*, November 2002, Boston, Massachusetts.
- [25] A. Yun-jo, "Systematic design of blended PBL: exploring the design experiences and support needs of PBL novices in an online environment," *Contemporary Issues in Technology and Teacher Education*, vol. 13, no. 1, pp. 61-79, 2013.
- [26] J. Eison, "Using active learning instructional strategies to create excitement and enhance learning," *The Center for Teaching Excellence at Cornell University*, 2010.
- [27] J. Borgford-Parnell, K. Deibel, and C. J. Atman, "From engineering design research to engineering pedagogy: bringing research results directly to the students," *International Journal of Engineering Education*, vol. 26, no. 4, pp. 748-759, 2010.
- [28] R. Seidel, "An integrated approach to the teaching of engineering design," in *International Conference on Engineering Education and Research - Progress Through Partnership*, VŠB-TUO, Ostrava, 2004.
- [29] A. Venkataswamy, R. Sodhi, Y. Abdildin, and B. P. Bailey, "Groupware for design: an interactive system to facilitate creative processes in team design work," in *Proceedings of the 42nd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2009.
- [30] H. Maldonado, B. Lee, S. R. Klemmer, and R. D. Pea, "Patterns of collaboration in design courses: team dynamics affect technology appropriation, artifact creation, and course performance".
- [31] I. E. Esparragoza, D. Gutierrez, M. Aguilar, C. Rodriguez, H. E. Maury, J. W. Penagos, J. Ocampo, D. Alvarez, and S. Navarro, "Building international collaboration experiences among



LACCEI institutions through global design projects,” *Latin American and Caribbean Journal of Engineering Education*, vo. 1, no. 1, pp. 20-26, 2007.

[32] O. Akir, T. H. Eng, and S. Malie, “Teaching and learning enhancement through outcome based education structure and technology e-learning support,” *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 62, pp. 87-92, 2012.

[33] J. J. Wood, D. D. Jensen, and K. Wood, “Enhancing machine design courses through use of a multimedia-based review of mechanics of materials,” in *Proceedings of the 2005 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition*.

[34] J. J. Wood, et al., “Enhancing machine design by creating a basic hands-on environment with mechanical breadboards,” *International Journal of Mechanical Engineering Education*, 2001.

[35] C. Pons-Lelardeux, M. Galaup, F. Segonds, and P. Lagarrigue, “Didactic study of a learning game to teach mechanical engineering,” in *The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2015 - Procedia Engineering 132*. pp. 242-250, 2015.

[36] C. DiGiano, L. Yarnall, C. Patton, J. Roschelle, D. Tatar, and M. Manley, “Collaboration design patterns: conceptual tools for planning for the wireless classroom,” in *Proceedings of the IEEE International Workshop on Wireless and Mobile Technologies in Education (WMTE’02)*, 2017.

[37] H. Chen, D. M. Cannon, J. Gabrio, and L. Leifer, “Using wikis and weblogs to support reflective learning in an introductory engineering design course,” in *American Society for Engineering Education Annual Conference and Exposition*, 2005.

[38] C. J. Walthall, S. Devanathan, L. G. Kisselburgh, K. Ramani, E. D. Hirleman, and M. C. Yang, “Evaluating wikis as a communicative medium for collaboration within colocated and distributed engineering design teams,” *Journal of Mechanical Design*, vol. 133, July 2011.

[39] O. McGarr, “A review of podcasting in higher education: its influence on the traditional lecture,” *Australasian Journal of Educational Technology*, vol. 25, no. 3, pp. 309-321, 2009.

[40] A. Carberry, C. Swan, G. Lemons, L. Jarvin, and C. Rogers, “Investigating engineering design through model-building,” in *Proceedings of the Research in Engineering Education Symposium*, 2009.

[41] M. Nagurka and F. Rodriguez-Anton, “Discovery learning experiments in a new machine design laboratory,” in *2013 ASEE Annual Conference, Atlanta, GA, June 23-26, 2013*.

[42] A. M. Dollar, A. E. Kerdok, S. G. Diamond, P. M. Novotny, and R. D. Howe, “Starting on the right track: introducing students to mechanical engineering with a project-based machine design course,” in *Proceedings of IMECE2005 2005 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition November 5-11, 2005, Orlando, Florida USA*.

[43] R. O’Neill, R. C. Geiger, K. Csavina, and C. Ondroff, “Making statics dynamic! combining lecture and laboratory into an interdisciplinary, problem based, active learning environment,” in *Proceedings of the American Society for Engineering Education 2007 Annual Conference and Exposition*, June 2007.

[44] J. M. Andujar, A. Mejia, and M. A. Marquez, “Augmented reality for the improvement of remote laboratories: an augmented remote laboratory,” *IEEE Trans. Educ.*, vol. 54, no. 3, pp. 492–500, 2011.

RESÚMENES

IV Congreso Internacional
AMDM 2018



Manufacturing Processes: Material Forming and Material Removal Processes from the Standpoint of Energy Economy

Jayanta Banerjee^{1, γ}, Alejandro Aponte²

1. Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Puerto Rico en Mayagüez (UPRM), Mayagüez, Puerto Rico
 2. Estudiante Avanzado de Pregrado, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Puerto Rico en Mayagüez (UPRM), Mayagüez, Puerto Rico
- γ. Autor corresponsal: jayanta.banerjee@upr.edu*

Resumen

Basando en el concepto del consumo de energía, esta ponencia presenta una síntesis de las formulaciones teóricas y evidencias experimentales para comprobar que se puede ahorrar una cantidad significativa de energía en los procesos tanto en el conformado como en la remoción de materiales. En el conformado, la clave para ahorrar energía es deformar plásticamente el material de trabajo apenas hasta el comienzo de la inestabilidad plástica y no más allá de ese punto. En remoción de material, la clave para ahorrar energía es controlar la fuerza externa de corte en lugar de controlar los ajustes de la máquina herramienta, tales como la velocidad de corte, el avance de la herramienta (cuchilla) y su penetración. La potencia consumida es una función de la fuerza y la velocidad de corte, mientras la tasa de remoción de material es una función de los ajustes de la máquina herramienta. Por lo tanto, optimizando los ajustes de la máquina herramienta y minimizando la fuerza de corte se consigue la potencia mínima de consumo durante el proceso de manufactura. Nuestros experimentos, tanto en el conformado como en la remoción de material apoyan este nuevo concepto de combinar la inestabilidad plástica con el control de fuerza en los procesos de manufactura.

Palabras clave: inestabilidad plástica, tasa de remoción del material, fuerza de corte.

Abstract

Based on the concept of energy consumption, the paper presents a synthesis of theoretical formulations and experimental evidences to prove that a significant amount of energy can be saved both in material forming as well as in material removal processes. In forming, the key to energy saving is to deform plastically the workpiece material only up to the onset of plastic instability and not beyond that point. In material removal, the key to energy saving is to control the external cutting force rather than controlling the machine settings, such as the cutting speed, the tool feed and the depth of cut. The power consumption is a function of the cutting force and the cutting speed, whereas the material removal rate is a function of the machine settings. Therefore, optimizing the machine settings and minimizing the cutting force we can get the minimum power consumption of a manufacturing process. Our experiments, both in material forming and in material removal processes, support this new concept of combining plastic instability and force control in manufacturing processes.

Keywords: plastic instability, material removal rate, cutting force.



Vulnerabilidad al Cambio Climático de los Sistemas de Electricidad con Participación de Hidroeléctricas: Revisión de Literatura

Vulnerability to Climate Change of Electricity Systems with Participation of Hydroelectrics: Literature Review

Juliana Restrepo Trujillo^{1,γ}, Ricardo Moreno Chuquen², Francly Nelly Jimenez García^{3,4}

1. Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, Colombia
 2. Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia
 3. Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, Colombia
 4. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Colombia
- γ. Autor corresponsal: juliana.restrepot@autonoma.edu.com*

Resumen

El sector de la energía eléctrica en Sur América es susceptible a la ocurrencia del fenómeno de El Niño.

El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) impulsa la variabilidad de las precipitaciones [1], [2], [3], y es el fenómeno climático dominante que produce condiciones climáticas extremas en varios países [4]. Los eventos de éste dependen de las interacciones acopladas de la dinámica del Océano Pacífico y la atmósfera en términos de intercambio de calor resultantes de las variaciones en las temperaturas del océano en el pacífico ecuatorial y la circulación atmosférica asociada [5]. El ENSO es un fenómeno con dos fases, la fase cálida: El Niño, y la fase fría: La Niña. Las fases ENSO ocurren cada 3 a 7 años [6] y sus impactos tienden a ser opuestos. En Colombia y al norte de la línea ecuatorial, El Niño se caracteriza por temperaturas superiores a la media y patrones de baja precipitación, mientras que los episodios de La Niña representan períodos de temperaturas por debajo del promedio y altos patrones de precipitación.

La naturaleza del ENSO ha variado significativamente con el tiempo: en este sentido hay evidencia con datos históricos de una tendencia de El Niño más prolongado y fuerte [7]. Por lo tanto, cada 3 a 7 años los sistemas de suministro de electricidad experimentarán una reducción considerable en el agua que ingresa a los sistemas de captación durante la fase de El Niño, mientras que, durante la fase de La Niña, el sistema experimentará abundantes flujos de agua que llegarán a los mismos. La agudeza de una fase de El Niño, es la severidad en la siguiente fase de La Niña, según reportes [7]. La incertidumbre asociada a las predicciones sobre la intensidad, duración y ocurrencia del fenómeno climático es alta, dado que corresponde a un sistema complejo que depende de variables climáticas las cuales están siendo modificadas por causa del cambio climático. A manera de caso, la predicción sobre El Niño de 2005 estaba lejos de la duración e intensidad experimentada durante dicho año [7].

Éste fenómeno impacta la generación de energía eléctrica debido a cambios en las precipitaciones, temperatura, patrones de viento, radiación solar, entre otros. El fenómeno de El Niño afecta a Colombia, Venezuela y el noroeste de Brasil con fuertes sequías que reducen la capacidad de



generación hidroeléctrica; en cambio, en Perú, Paraguay, Bolivia, Uruguay, Argentina y el sur de Brasil, causa fuertes lluvias que conllevan al aumento del nivel de los embalses.

El cambio climático modifica los patrones de duración, frecuencia e intensidad del ENSO afectando la confiabilidad de un sistema de suministro eléctrico dependiente del recurso hídrico para generar energía eléctrica de acuerdo con requisitos económicos y de seguridad.

La vulnerabilidad de los sistemas de generación eléctrica de Brasil, Ecuador, Perú, Panamá, Canadá, Noruega, Costa Rica y Nueva Zelanda es causada por las fluctuaciones en la disponibilidad del recurso hídrico. En este trabajo se analizaron las medidas propuestas por estos países para evaluar la posibilidad de adaptación en el entorno colombiano.

Palabras clave: fenómeno de El Niño, vulnerabilidad, Colombia, generación.

Abstract

The South American electric power industry is susceptible to be affected by the occurrence of the El Niño phenomenon.

The Niño-Southern Oscillation (ENSO) boosts rainfall variability [1], [2], [3], and is the dominant climate phenomenon that produces extreme climatic conditions in several countries [4]. The events of this depend on the coupled interactions of the dynamics of the Pacific Ocean and the atmosphere in terms of heat exchange resulting from variations in ocean temperatures in the equatorial Pacific and the associated atmospheric circulation [5]. The ENSO is a phenomenon with two phases, the warm phase: El Niño, and the cold phase: La Niña. ENSO phases occur every 3 to 7 years [6] and their impacts tend to be opposite. In Colombia and north of the equatorial line, El Niño is characterized by higher than average temperatures and low rainfall patterns, while La Niña episodes represent periods of below-average temperatures and high precipitation patterns.

The nature of the ENSO has varied significantly over time: in this sense there is evidence with historical data of a longer and stronger El Niño trend [7]. Therefore, every 3 to 7 years the electricity supply systems will experience a considerable reduction in the water entering the collection systems during the El Niño phase, while, during the La Niña phase, the system will experience abundant water flows that will reach them. The sharpness of an El Niño phase is the severity in the next phase of La Niña, according to reports [7]. The uncertainty associated with the predictions about the intensity, duration and occurrence of the climatic phenomenon is high, since it corresponds to a complex system that depends on climatic variables which are being modified due to climate change. As a case, the prediction about El Niño in 2005 was far from the duration and intensity experienced during that year [7].

This phenomenon impacts the generation of electrical energy due to changes in rainfall, temperature, wind patterns, solar radiation, among others. The El Niño phenomenon affects Colombia, Venezuela and northwestern Brazil with severe droughts that reduce hydroelectric generation capacity; On the other hand, in Peru, Paraguay, Bolivia, Uruguay, Argentina and the south of Brazil, it causes heavy rains that lead to an increase in the level of reservoirs.



Climate change modifies the duration, frequency and intensity patterns of the Southern El Niño oscillation (ENSO), affecting the reliability of a water supply system dependent on water resources to generate electricity in accordance with economic and safety requirements.

The vulnerability of electricity generation systems in Brazil, Ecuador, Peru, Panama, Canada, Norway, Costa Rica and New Zealand is caused by fluctuations in the availability of water resources. In this paper, the measures proposed by these countries to evaluate the possibility of adaptation in the Colombian environment were analyzed.

Keywords: El Niño Southern Oscillation, vulnerability, Colombia, electric power generation

Referencias

- [1] S. Power, T. Casey, C. Folland, A. Colman, and V. Mehta, “Inter-decadal modulation of the impact of ENSO on Australia,” *Clim. Dyn.*, vol. 15, no. 5, pp. 319–324, May 1999.
- [2] M. S. Ropelewski, C.F., Halpert, “Precipitation Patterns Associated with the High Index Phase of the Southern Oscillation,” *J. Clim.*, vol. 2, pp. 268–284, 1988.
- [3] Australian Bureau of Meteorology and Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), “Climate Change in the Pacific: Scientific Assessment and New Research Volume 1: Regional Overview,” 2011.
- [4] W. Cai *et al.*, “ENSO and greenhouse warming,” *Nat. Clim. Chang.*, vol. 5, no. 9, pp. 849–859, Sep. 2015.
- [5] J. D. Neelin *et al.*, “ENSO theory,” Wiley-Blackwell, Jun. 1998.
- [6] NOAA Climate.gov staff, “El Niño and La Niña: Frequently asked questions | NOAA Climate.gov.” 2016.
- [7] K. E. Trenberth, D. P. Stepaniak, K. E. Trenberth, and D. P. Stepaniak, “Indices of El Niño Evolution,” *J. Clim.*, vol. 14, no. 8, pp. 1697–1701, Apr. 2001.



Properties of Bamboo Fibres and Bamboo Fibre Composites

Propiedades de las Fibras de Bambú y de los Compuestos con Fibras de Bambú

L. Osorio^{1,γ}, E. Trujillo¹, J. Ivens¹, I. Verpoest,¹ A.W. Van Vuure¹

Department of Metallurgy and Materials Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Heverlee, Belgium

γ. Autor corresponsal: linarocio.osorioserna@kuleuven.be

Extended Abstract

A novel mechanical extraction process was developed to obtain long bamboo fibres from the bamboo culm to be used as reinforcement in structural composites for high end uses (Fig. 1). A single-fibre tensile test at four different span lengths for fibres of the bamboo species *Guadua angustifolia* was performed showing values of strength up to 800 MPa and E-modulus up to 43 GPa, proving their adequate tensile properties [1].



Figure 1. Bamboo technical fibres after mechanical extraction

The strength distribution of the fibres was characterized based on a new approach to evaluate the effect of defects introduced by the extraction process as function of different scale variables: fibre length, fibre surface area and fibre volume. The modified Weibull distribution, a practical model requiring only three parameters, described accurately the strength distribution of the fibres at different gauge lengths. The average fibre strength decreased with increasing gauge length, from 943 MPa at $L = 1$ mm to 733 MPa at $L = 40$ mm and it was nearly independent of the mean fibre volume [2].

In order to make an adequate use of the new reinforcement, it is indispensable to comprehensively understand the fibre behavior as a function of the microstructure. Different features like the distribution of the elementary fibres within the fibre bundle, dimensions and layering pattern of the elementary fibres (Fig. 2) and the main microfibrillar angles were measured (Fig. 3). The Young's



modulus of the elementary fibre is analyzed based on the micromechanics of composite materials, commonly used for unidirectional short fibre composites, and the fibre microstructure [3].

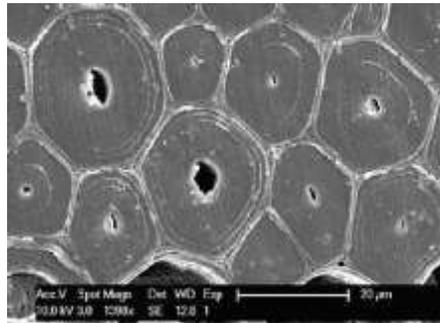


Figure 2. Layering of bamboo elementary fibres

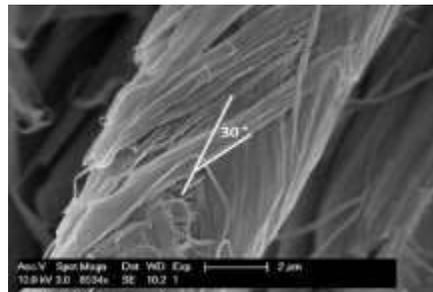


Figure 3. Microfibrils

Bamboo fibre/epoxy composites were produced with untreated and alkali-treated fibres. Flexural and tensile tests were performed. The longitudinal flexural strength is higher when untreated fibres are used while the treatment benefits the longitudinal flexural stiffness of the composite. Transverse strength increases at lower alkali concentrations, but the transverse three-point bending strength of untreated bamboo in epoxy is already quite high [1].

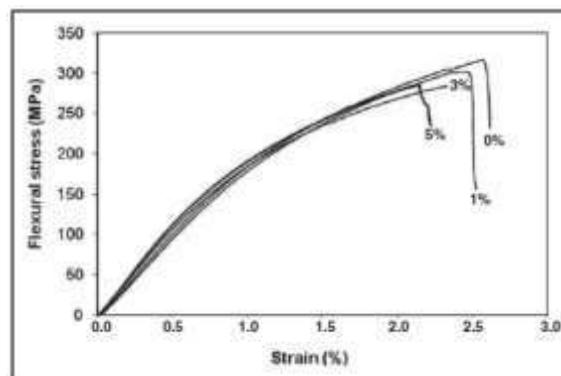


Figure 4. Stress–strain curve for longitudinal flexural properties of BFC treated at different concentrations of alkali (NaOH) (20 min at RT).



For UD bamboo fibre thermoplastic PP composites, flexural tests with two fibre orientations were performed (Fig. 5). The material performance was reasonable. It was found that that the use of inert atmosphere during the consolidation phase can be a well controlled process that can be easily adapted for the processing of natural fibres and thermoplastics. Flexural strength for bamboo fibre/polypropylene composites consolidated under inert atmosphere, indicated a significant improvement (30%) of the flexural strength, especially for (relatively) high processing temperatures (230 °C).

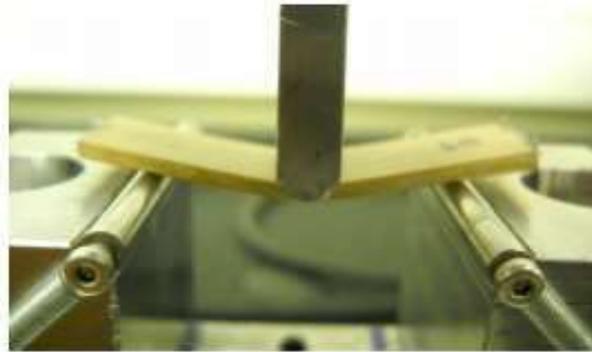


Figure 5. 3PBT for bamboo fibre-PP composites (with fibres in longitudinal direction).

Keywords: Bamboo fibre, natural fibre, bamboo fibre composite, mechanical properties, microstructure, micromechanics of composites.

References

- [1] L. Osorio, E. Trujillo, A. W. Van Vuure, and I. Verpoest, "Morphological aspects and mechanical properties of single bamboo fibres and flexural characterization of bamboo/ epoxy composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 30, pp. 396-408, March 1, 2011.
- [2] E. Trujillo, M. Moesen, L. Osorio, A. W. Van Vuure, J. Ivens, I. Verpoest. Bamboo fibres for reinforcement in composite materials: Strength Weibull analysis. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014. 61: p. 115-125.
- [3] L. Osorio, E. Trujillo, F. Lens, J. Ivens, I. Verpoest and A. W. Van Vuure. In-depth study of the microstructure of bamboo fibres and their relation to the mechanical properties. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, First Published June 17, 2018.
- [4] E. Trujillo, J. Vertommen, L. Osorio, A. W. Van Vuure, J. Ivens and I. Verpoest. Investigating the flexural properties of bamboo fibre – PP composites consolidated under inert atmosphere. ICCM-19, 2013. International Conference on Composite Materials. Montreal, Canada.



Energía Firme de Plantas Solares Fotovoltaicas en Colombia para el Cargo por Confiabilidad

Firm Energy of Photovoltaic Solar Plants in Colombia for the Reliability Charge

Héctor Olivar Sánchez^{1, γ}, Ricardo Moreno Chuquen¹, Paula Garizado Román²

1. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Occidente, Colombia. .

2. Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas, Universidad Autónoma de Occidente, Colombia.

γ. Autor corresponsal: hector.olivar@uao.edu.co

Resumen

La CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas) ha definido una metodología específica en la Resolución 201 de 2017 para calcular la energía firme de plantas solares fotovoltaicas. La energía firme consiste en un mecanismo del mercado de energía eléctrica en Colombia para garantizar el suministro de energía en periodos de escasez. Usualmente, la valoración de la energía firme en Colombia depende de la disponibilidad del combustible y del factor de planta de la central de generación. La Resolución 201 de 2017 de la CREG define estimar la energía de una planta en cuatro pasos, primero, calcular la energía firme mensual; segundo, calcular la energía por día para cada mes; en el tercer paso, obtener el menor valor de energía obtenido por día y finalmente, calcular la ENFICC (Energía Firme para el Cargo por Confiabilidad) acorde a un factor de uso. La remuneración por energía firme podría incentivar la integración de nuevas centrales renovables en Colombia. Este artículo realiza una evaluación de la Resolución 201 de 2017 incluyendo todos los detalles y lleva a cabo un caso de estudio para calcular la energía firme de una planta solar fotovoltaica de 10MW.

Palabras clave: Comisión de Regulación de Energía y Gas, energía firme, cargo por confiabilidad, plantas solares fotovoltaicas, Resolución, metodología.

Abstract

The CREG (Energy and Gas Regulation Commission) has defined the methodology to calculate the firm energy of photovoltaic solar plants in Resolution 201 of 2017. The firm energy consists of a mechanism of the electricity market in Colombia to guarantee the supply of energy in periods of shortage. Usually, the valuation of firm energy in Colombia depends on the availability of fuel and the plant factor of the generation plant. The Resolution of the CREG defines estimating the energy of a plant in four steps, first, calculate the monthly firm energy; second, calculate the energy per day for each month; third step, obtain the lowest value of energy obtained per day and finally, calculate the ENFICC (Firm Energy for the Reliability Charge) according to a use factor. The remuneration for firm energy could encourage the integration of new renewable power plants in Colombia. This article makes an evaluation of Resolution 201 of 2017 including all the details and carries out a case study to calculate the firm energy of a 10MW photovoltaic solar plant.

Keywords – Commission of Regulation Energy and Gas, firm energy, reliability charge, photovoltaic solar plants, resolution, methodology.



Referencias

- [1] Cargo por confiabilidad. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía, pp.1-4. [Consultado 11 Jun. 2017]. 2017. Disponible en: <http://www.xm.com.co/Promocin%20Primera%20Subasta%20de%20Energia%20Firme/abc2.pdf>
- [2] Creg.gov.co. CREG · Comisión de Regulación de Energía y Gas. [En línea]. Bogotá. [Consultado 8 Jun. 2017]. 2017. Disponible en internet: http://www.creg.gov.co/cxc/secciones/obligacion_energia_firme/obligacion_energia_firme.htm
- [3] Creg.gov.co. CREG · Comisión de Regulación de Energía y Gas. Bogotá. [Consultado 9 Jun. 2017]. 2017. Disponible en Internet: <http://www.creg.gov.co/cxc/secciones/enficc/enficc.htm>
- [4] Creg.gov.co. CREG · Comisión de Regulación de Energía y Gas. Bogotá. [Consultado 19 Jun. 2017]. 2017. Disponible en Internet: [http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/d4d218c62caa299f052581560078f5f8/\\$FILE/D-030-17%20ASIGNACI%C3%93N%20ADMINISTRADA%20DEL%20CARGO%20POR%20CONFIABILIDAD.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/d4d218c62caa299f052581560078f5f8/$FILE/D-030-17%20ASIGNACI%C3%93N%20ADMINISTRADA%20DEL%20CARGO%20POR%20CONFIABILIDAD.pdf)
- [5] Creg.gov.co. CREG · Comisión de Regulación de Energía y Gas. [En línea]. Bogotá. [Consultado 20 Jun. 2018]. 2018. Disponible en Internet: <http://www.creg.gov.co/phocadownload/presentaciones/co-sin%2020.11.2014.pdf>
- [6] República de Colombia. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 148 de 2011. (Octubre 21). Por la cual se define la metodología para determinar la energía firme de plantas eólicas. 2011. p. 1-5.
- [7] República de Colombia. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 201 de 2017. (Diciembre 27). Por la cual se define la metodología para determinar la energía firme de plantas solares fotovoltaicas. 2017. p. 8.
- [8] República de Colombia. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 242 de 2016. (Diciembre 19). Por la cual se define la metodología para determinar la energía firme de plantas eólicas. 2016. p. 1-10.
- [9] República de Colombia. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 243 de 2016. (Diciembre 19). Por la cual se define la metodología para determinar la energía firme de plantas solares fotovoltaicas. 2016. p. 1-10.
- [10] República de Colombia. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 1715. (13, mayo, 2014). Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Bogotá D.C. 2014. 26 p.



Estimación de Huella de Carbono por Vehículos de Carga Pesada en Manizales, Colombia

Estimation of Carbon Footprint by Heavyweight Vehicles in Manizales, Colombia

Olga Lucia Ocampo López^{1, γ}, Diana Yulieth Soto Pineda²

1. Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, Colombia

γ. Autor corresponsal: olocampo@autonoma.edu.co

Resumen

El cambio climático que experimenta el medio ambiente se debe al incremento en la temperatura promedio de la tierra, que es producto de la acumulación de gases de efecto invernadero emitidos por las actividades humanas de producción, extracción, asentamiento y consumo. Los gases de efecto invernadero (GEI) son medidos en término de CO₂ equivalente (CO₂eq). Los GEI conocidos como precursores potenciales de calentamiento atmosférico son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido de nitrógeno (N₂O), los hidrofluorocarbonos (HFC), y otros. El dióxido de carbono es el principal gas de efecto invernadero que se genera como producto de las actividades humanas. Este gas llega a la atmosfera proveniente de la quema de combustibles fósiles como son el carbón, el gas natural, el petróleo y sus derivados, su acumulación altera todos los ciclos atmosféricos que convergen en expresiones locales concretas, tales como, mayor volumen y frecuencia de los eventos climáticos extremos, entre los cuales están los huracanes, lluvias torrenciales, sequías, heladas, entre otros. La estimación de la huella de carbono en su expresión más simple, es el producto de los datos de actividad (unidad de masa GEI, tiempo, distancia, energía, etc.) y los factores de emisiones. En la flota vehicular de Manizales, el contaminante con mayor presencia es el monóxido de carbono, con un flujo de aproximadamente 14 4723 kg/día (75.8%), además de los compuestos orgánicos volátiles con 23 552.4 kg/día (12.3%) y los óxidos de nitrógeno con 19 194.8 kg/día (10.1%). En este documento se obtienen datos de actividad de vehículos de carga pesada de la ciudad a través del levantamiento de información primaria en puntos clave donde confluye mayor circulación de este tipo de automotores, para luego mediante el uso de los factores de emisión proporcionados por el modelo IVE (International Vehicle Emissions) se calculan las emisiones de GEI.

Palabras clave: gases de efecto invernadero, fuentes móviles, vehículos de carga pesada, huella de carbono, factores de emisión, cambio climático.

Abstract

The climate change experienced by the environment is due to the increase in the average temperature of the earth, which is the product of the accumulation of greenhouse gases emitted by human activities of production, extraction, settlement and consumption. Greenhouse gases (GHG) are measured in terms of CO₂ equivalent (CO₂eq). The GHGs known as potential global warming precursors are carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), nitrogen oxide (N₂O), hydrofluorocarbons (HFC), and others. Carbon dioxide is the main greenhouse gas generated as a result of human



activities. This gas reaches the atmosphere from the burning of fossil fuels such as coal, natural gas, oil and its derivatives, its accumulation alters all atmospheric cycles that converge in specific local expressions, such as, greater volume and frequency of the extreme climatic events, among which are the hurricanes, torrential rains, droughts, frosts, among others. The estimation of the carbon footprint in its simplest expression is the product of the activity data (unit of mass GHG, time, distance, energy, etc.) and the emission factors. In the vehicular fleet of Manizales, the pollutant with greater presence is carbon monoxide, with a flow of approximately 14 4723 kg / day (75.8%), in addition to volatile organic compounds with 23 552.4 kg / day (12.3%) and oxides of nitrogen with 19 194.8 kg / day (10.1%). In this document we obtain data on the activity of heavy-load vehicles in the city through the collection of primary information at key points where this type of vehicles converge, and then by using the emission factors provided by the model. IVE (International Vehicle Emissions) GHG emissions are calculated.

Keywords: greenhouse gases, mobile sources, heavyweight vehicles, carbon footprint, emission factors, climate change.

Introducción

Entre las acciones de mitigación del cambio climático se encuentra la reducción de gases de efecto invernadero (GEI) producidos por la quema de combustibles fósiles en el sector transporte [1]. Es necesario contar con indicadores como la huella de carbono, que totalice los GEI emitidos de una actividad, sector o región [2], de tal manera que se pueda estimar el impacto de las políticas de mitigación, especialmente, en la contaminación por fuentes móviles en las ciudades.

La determinación de la huella de carbono por fuentes móviles es compleja teniendo en cuenta la diversidad de vehículos, tecnologías y modos de opera La determinación de la huella de carbono por fuentes móviles es compleja teniendo en cuenta la diversidad de vehículos, tecnologías y modos de operación [3]. Los estudios muestran la influencia de los vehículos pesados en la generación de GEI [4] [3] y en el país se reporta además su impacto en la contaminación atmosférica, dado que este parque automotor es antiguo [5]. En la ciudad de Manizales se han realizado diferentes estudios para la estimación de la huella de carbono de la flota vehicular. Para los vehículos de carga pesada se han empleado diferentes factores de actividad (kilómetros 8 880 km/año [6] y 30 000 km/año [5] [7]); sin tener en cuenta la diversidad de fuentes. Este estudio presenta el análisis de los factores de actividad de un grupo vehículos de carga pesada que transitan por la zona industrial y en obras civiles en la ciudad de Manizales. Sin embargo, existe emisiones de GEI que son aportadas por vehículos de carga pesada que transitan desde otras ciudades y por un tiempo fijo circulan en las calles de la ciudad, esta flota transitoria no es tenida en cuenta debido a que la Secretaria de Transito de Manizales no posee una base anual que incluya a estos vehículos.

Métodos

En este caso se empleó la metodología establecida por el IPCC en el 2006 considerando la guía para el sector energía [8]. Las fuentes móviles evaluadas fueron: camiones de 2 Ejes, retroexcavadoras, montacargas y volquetas. Para recolectar los datos de actividad de estas categorías vehiculares, fue necesario realizar una serie de encuestas en el sector industrial (barrio La Enea, kilómetro 2 vía Termales el Otoño, zona industrial Malteria, parque industrial Juanchito) y en obras civiles localizadas en el terminal de transporte Los Cambulos. A partir de la información recolectada, se determinaron los modelos de regresión de lineal para cada tipo de vehículo pesado,



teniendo en cuenta el modelo y la distancia recorrida; estos modelos fueron validados teniendo en cuenta el análisis de significancia de los β individuales ($\alpha < 0,05$), la prueba global del modelo ($\alpha < 0,05$) y la verificación de los supuestos de distribución normal de los errores (Shapiro-Wilk test, significancia de 0,05), homocedasticidad (Prueba de White) y la no correlación en los errores (Durbin Watson test); para tal efecto se empleó el software estadístico IBM SSPS.

El cálculo de las emisiones provenientes de cada categoría se estimó a partir de la ecuación 1:

$$E_{ij} = FE_{ij} * FA_j * NV_j \quad (1)$$

Donde:

E_{ij} = Emisiones totales del contaminante i en la categoría vehicular j (Ton/año)

FE_{ij} = Factor de emisión del contaminante i en la categoría vehicular j (g/Km)

FA_j = Factor de actividad de la categoría vehicular j (Km/año)

NV_j = Número total de vehículos de la categoría j

Resultados

Los resultados de los factores de actividad expresados en kilómetros por año para todas las categorías evaluadas, se consolidan en la Tabla 1. Con esta información, se estimó la huella de Carbono considerando los aforos vehiculares de la Secretaría de Tránsito y transporte de la ciudad de Manizales.

Categoría vehicular	km/año
Camiones 2 Ejes	41 340
Volquetas	38 200
Retroexcavadoras	6 084
Montacargas	3 600

Tabla 1: Factores de actividad de algunas fuentes móviles del parque automotor de transporte pesado en Manizales. Fuente: Elaboración propia.

De las Tablas 2 a la 6 se muestran los factores de emisión y las emisiones totales de GEI para los contaminantes CO₂, CH₄, N₂O y los precursores NO_x, CO y COV, esto para cada categoría vehicular del parque automotor de Manizales de los que se obtuvieron los datos de actividad. Los factores de emisión para vehículos pesados se tomaron del Modelo IVE (International Vehicle Emissions) en su reporte del año 2006 [9].

Categoría	Factor de actividad		Factor de Emisión CO ₂		Huella de Carbono CO ₂	Total vehículos	Emisiones CO ₂
	km/año	Fuente	g/km	Fuente	kg/año	Secretaría de Tránsito de Manizales (2015)	ton/año
Camiones de 2 ejes	41 340	Encuestas	960	IVE (2006)	39 686	3 508	139 220
Volquetas	38 200				36 672	555	20 353
Retroexcavadoras	6 084				5 841	5	29
Montacargas	3 600				3 456	2	7

Tabla 2: Emisiones CO₂. Fuente: Elaboración propia.



Categoría	Factor de actividad		Factor de Emisión CH4 y N2O		Huella de Carbono por CH4 y N2O	Total vehículos	Emisiones CH4 y N2O
	km/año	Fuente	g/km	Fuente	kg/año	Secretaría de Tránsito de Manizales (2015)	ton/año
Camiones de 2 ejes	41 340	Encuestas	19.59	IVE (2006)	810	3 508	2 841
Volquetas	38 200				748	555	415
Retroexcavadoras	6 084				119	5	1
Montacargas	3 600				71	2	0.141

Tabla 3: Emisiones CH4 y N2O. Fuente: Elaboración propia.

Categoría	Factor de actividad		Factor de Emisión NOx		Huella de Carbono por NOx	Total vehículos	Emisiones NOx
	km/año	Fuente	g/km	Fuente	kg/año	Secretaría de Tránsito de Manizales (2015)	ton/año
Camiones de 2 ejes	41 340	Encuestas	7.9	IVE (2006)	327	3 508	1 146
Volquetas	38 200				302	555	167
Retroexcavadoras	6 084				48	5	0.240
Montacargas	3 600				28	2	0.057

Tabla 4: Emisiones CH4 y N2O. Fuente: Elaboración propia.

Categoría	Factor de actividad		Factor de Emisión CO		Huella de Carbono por CO	Total vehículos	Emisiones CO
	km/año	Fuente	g/km	Fuente	kg/año	Secretaría de Tránsito de Manizales (2015)	ton/año
Camiones de 2 ejes	41 340	Encuestas	5.3	IVE (2006)	219	3 508	769
Volquetas	38 200				202	555	112
Retroexcavadoras	6 084				32	5	0.161
Montacargas	3 600				19	2	0.038

Tabla 5: Emisiones CO. Fuente: Elaboración propia.

Categoría	Factor de actividad		Factor de Emisión COV		Huella de Carbono por COV	Total vehículos	Emisiones COV
	km/año	Fuente	g/km	Fuente	kg/año	Secretaría de Tránsito de Manizales (2015)	ton/año
Camiones de 2 ejes	41 340	Encuestas	1.0	IVE (2006)	41	3508	145
Volquetas	38 200				38	555	21
Retroexcavadoras	6 084				6	5	0.030
Montacargas	3 600				4	2	0.007

Tabla 6: Emisiones COV. Fuente: Elaboración propia.

Discusión

La información de factores de actividad disponible en la literatura para vehículos de carga pesada, comúnmente no está discriminada por tipo de fuente, por lo cual pueden presentarse errores en el cálculo de la huella de carbono. Estos factores dependen de la región y por tanto, se requiere una obtención puntual, por esto se realizaron encuestas en los sitios más pertinentes. En cuanto a las



emisiones estimadas de los gases de efecto invernadero, es evidente que el CO₂ tiene una participación más alta que los otros GEI, esto también se debe al alto factor de emisión de este gas; los cálculos pueden ser más precisos si se pudiese conocer la cantidad de flota vehicular de carga pesada que entra a la ciudad en ciertas temporadas, más propiamente cuando hay obras civiles en varios puntos de la ciudad, pero la Secretaria de Tránsito de la ciudad no proporciona un balance de la cantidad de vehículos que entran a Manizales, aun así las emisiones de estos vehículos de carga pesada entre vehículos para obras civiles y camiones de transporte, incrementan los GEI en la ciudad.

Referencias

- [1] IPCC, *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, vol. 2: Energía, IPCC, 2014.
- [2] CEPAL, «Metodologías de cálculo de la Huella de Carbono y sus potenciales implicaciones para América Latina,» 2010.
- [3] S. Tolvett Caro, P. Henríquez y M. Osses, «Análisis de variables significativas para la generación de un inventario de emisiones de fuentes móviles y su proyección,» *Ingeniare*, 2016.
- [4] EPA, «Cars, Trucks, and Climate: EPA Regulation of Greenhouse Gases from Mobile Sources,» Environmental Protection Agency, 2016.
- [5] P. Rodríguez y E. Behrentz, «Actualización del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá a través de mediciones directas,» Bogotá, 2009.
- [6] Y. Salguero, «Inventario Preliminar de Emisiones por Fuentes Móviles para la Ciudad de Manizales,» Manizales, 2014.
- [7] O. L. Ocampo López, «Evidencias de Gases de Efecto Invernadero para la ciudad de Manizales,» Manizales, 2014.
- [8] IPCC. Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático, «Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Vol 2: Energía,» Japón, 2006.
- [9] IVE, «International Vehicle Emissions Model User Manual,» 2006.



Monitoreo de la Integridad Estructural basado en Impedancia de Muestras de Hueso con un Diente Integrado y Acoplado a un Dispositivo Piezo-actuado

Impedance-based Structural Health Monitoring of Bone Samples with an Imbedded Tooth and Coupled to a Piezo-actuated Device

Hector A. Tinoco^{1, 2, γ}, Carlos I. Cardona¹, Daniel R. Barco¹, Fabio M. Peña¹, Juan P. Gomez³, Samuel I. Roldan-Restrepo⁴

1. Laboratorio de Mecánica Computacional y Experimental, Universidad Autónoma de Manizales, Colombia
2. Institute of Physics of Materials, Academy of Sciences of Czech Republic, Brno, Czech Republic
3. Departamento de Salud, Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, Colombia.
4. Centro de Innovación Roldan, Medellin-Antioquia,
γ. Autor corresponsal: htinoco@autonoma.edu.co

Resumen

El monitoreo terapéutico de los cambios en la densidad mineral ósea (DMO) se considera un desafío en el diagnóstico de enfermedades. La variabilidad en la microestructura y la mineralización ósea corresponden con muchas relaciones metabólicas en el cuerpo humano y la observación continua de estas variables puede ser costosa. El hueso mandibular y el maxilar son estructuras acopladas a los dientes y estos pueden funcionar como interfaces que conectan al hueso, por lo tanto, este podría ser monitoreado mecánicamente a través de estos. En este estudio, se desarrolló un dispositivo piezo-actuado para monitorear cambios estructurales en muestras de Oseas con dientes implantados, como se muestra en la Figura 1. Las muestras de huesos se extrajeron de huesos de bovinos que se prepararon mediante un proceso de limpieza para construir un sistema que imita el acoplamiento hueso-diente. El piezo-dispositivo se acopló a un diente humano mediante una unión mecánica provista por un bracket utilizado en tratamientos de ortodoncia. Un método de monitoreo basado en la impedancia se describe para identificar las variaciones de masa en el hueso realizadas mediante perforaciones. Los resultados evidenciaron que cuando se elimina una cantidad de masa, los cambios se cuantifican mediante mediciones de resistencia eléctrica en el Piezo-dispositivo.

Palabras clave: Hueso, monitoreo de la integridad estructural, impedancia eléctrica, piezoeléctrico, diente.

Abstract

Monitoring therapeutic based on changes in bone mineral density (BMD) is considered a challenge in the diagnosis of diseases. The variability in the bone microstructure and mineralization corresponds with many metabolic relations in the human body and the continuous observation judged by changes in BMD can be an expensive activity. Mandibular and maxillary bone are



structures coupled to teeth and these can work as exposed interfaces that connect the bone, therefore these could to monitor it mechanically. In this study, a piezo-actuated device was developed to monitor structural changes in bone specimens with implanted teeth, as shown in Figure 1. Bone samples were extracted from bovine hit bones which were prepared by a cleaning process to construct the specimens that mimic the bone-tooth system. The piezo-device was coupled to a human tooth by a mechanical coupling provided by a bracket used in orthodontic treatments. An impedance-based structural health monitoring method was described to identify the mass variations in the bone done by drillings. Results evidenced that when a quantity of mass is removed, the changes are quantified by electrical resistance measurements in the piezo-device.

Keywords: Bone, structural health monitoring, electrical impedance, piezoelectric, teeth

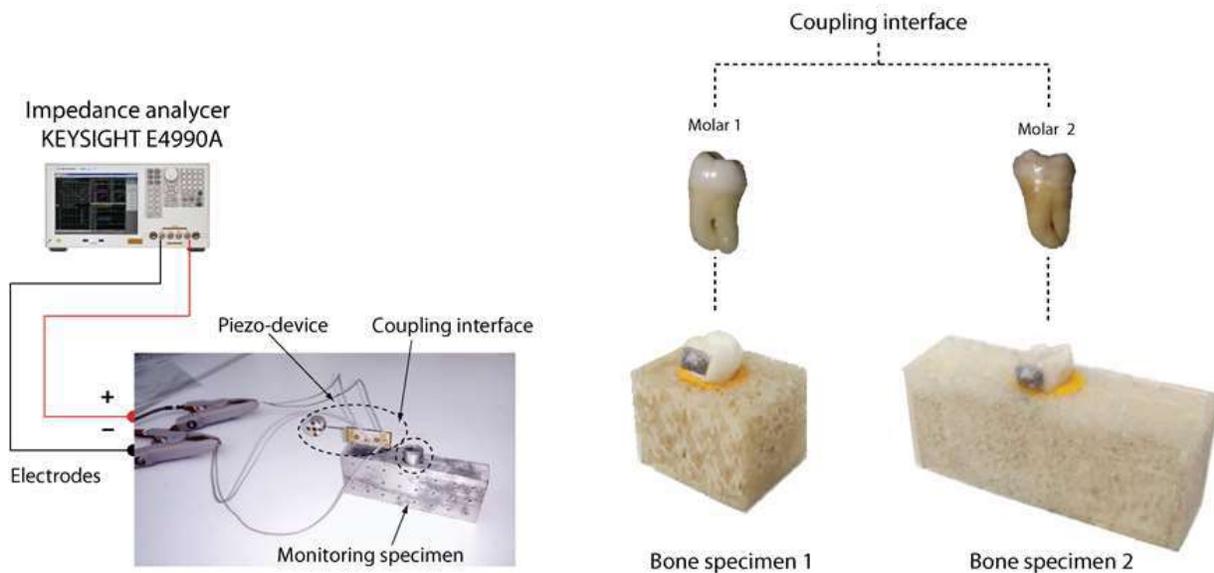


Figure 1. Experimental setup with the bone samples



Aprovechamiento del Momento Lineal y Angular de los Haces Acústicos para la Generación de Energía Eléctrica: Resultados Preliminares

Harnessing of Linear and Angular Momentum from Acoustic Beams for Electrical Power Generation: Preliminary Results

Ruben Dario Muelas-Hurtado^{1,2, γ}, Joao L. Ealo C.^{1,2}, Jhon F. Pazos-Ospina.^{1,3}

1. Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad del Valle, Cali, Colombia

2. Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia

3. Escuela Militar de Aviación Marco Fidel Suárez, Fuerza Aérea Colombiana, Cali, Colombia

γ. Autor correspondiente: ruben.muelas@correounivalle.edu.co

Resumen

Los campos acústicos son conformaciones de ondas mecánicas que ocurren en un amplio rango de frecuencias y que, al interactuar con la materia, inducen desplazamientos, deformaciones y rotaciones a los objetos insonificados [1-4]. Así como transportan momento lineal, ciertos campos acústicos, como los vórtices acústicos, han mostrado la capacidad de transportar momento angular a lo largo de su eje de propagación, de modo que, al interactuar con la materia, parte de la energía transportada es transferida [1]. Este fenómeno induce sobre la materia rotación debido a la estructura del haz, sin embargo, la rotación también es posible si los objetos presentan superficies especiales, por ejemplo: hélices, helicoides o superficies quirales [2]. Una vez los objetos rotan por efecto del haz incidente, la rotación puede ser aprovechada para ser convertida en energía eléctrica. En este trabajo mostramos resultados preliminares sobre la conversión de ondas acústicas en energía eléctrica empleando dos diferentes tipos de haces acústicos: frentes de ondas planos y frentes de ondas helicoidales, con carga topológica 1 y 2, para hacer rotar una hélice acoplada a un microgenerador. La máxima potencia eléctrica generada es de aproximadamente 4 nW. El proyecto general de investigación busca evaluar la posibilidad de recolectar energía contenida en ruido acústico residual, por medio de la utilización de “turbinas acústicas”.

Palabras clave: Recolección de energía, haces acústicos, momento angular, potencia eléctrica.

Abstract

Acoustic fields are conformations of mechanical waves present in the environment over a wide range of frequencies. When interacting with matter, acoustic fields are able to induce displacement, deformation and rotation on objects [1-4]. In addition to the linear momentum transported, certain acoustic fields, such as acoustic vortices, have shown the ability to transport angular momentum along their propagation axis. When interacting with matter, part of the energy transported is transferred [1,4]. This phenomenon induces rotation due to the structure of the beam. However, this is also achievable when the insonified object exhibits a special surface, e.g., a propeller, helicoids or chiral surfaces [2]. Once the objects rotate due to the effect of the incident beam, the motion can be converted into electrical power. In this work, we show preliminary results on the conversion of acoustic waves into electrical power using two different types of acoustic beams: plane and helical wavefronts to rotate a propeller coupled to a microgenerator. The maximum



electrical power generated so far is approximately 4 nW. The main goal of this research aims to quantify the feasibility of harvesting energy from industrial noisy environments.

Keywords: Acoustic beams, angular momentum, electrical power, energy conversion.

Referencias

- [1] K. Volke-Sepúlveda, A. O. Santillán, and R. R. Boullosa, “*Transfer of angular momentum to matter from acoustical vortices in free space*”, Phys. Rev. Lett., vol. 100, p. 024302, Jan. 2008.
- [2] Régis Wunenburger, Juan Israel Vazquez Lozano, and Etienne Brasselet, “*Acoustic orbital angular momentum transfer to matter by chiral scattering*,” New Journal of Physics 17 (2015), No. 10, 103022.
- [3] Asier Marzo, Sue Ann Seah, Bruce W. Drinkwater, Deepak Ranjan Sahoo, Benjamin Long, and Sriram Subramanian, “*Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects*”, Nature Communications 6 (2015), 8661.
- [4] R.D. Muelas-Hurtado, “*Estimación del momento angular transferido por un vórtice acústico a objetos con diferentes geometrías*,” Tesis de Maestría, Universidad del Valle, Cali, 2015.



Combinación de Técnicas Acústicas y Fotónicas para Estimar Contenido de Agua en Hojas de Plantas

Combining Acoustics and Photonics for Water Content Estimation in Plant Leaves

David Alejandro Collazos-Burbano ^{1,γ}, Joao Luis Ealo Cuello ¹, John Henry Reina Estupiñan ²

1. Laboratorio de Vibraciones y Acústica (LaVA), Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad del Valle, Cali, Colombia

2. Centro de Investigación en Bio-Informática y Fotónica (CIBioFi), Universidad del Valle, Cali, Colombia

γ. Autor correspondiente: david.collazos@correounivalle.edu.co

Resumen

El cambio climático es un factor que nos afecta actualmente, y tiene impacto directo en la disponibilidad de agua en todo el planeta. Sumado a esto, las actividades agrícolas utilizan cerca del 70% del agua disponible para consumo. Adicionalmente, se estima que para el 2050 el consumo de agua en cultivos se incrementa en un 19%, de tal manera que se pueda satisfacer la demanda de alimento de la población en crecimiento. De acuerdo con este panorama, es claro que debemos mejorar los métodos y sistemas de riego que actualmente se utilizan en la agricultura, iniciando por los instrumentos empleados para medir parámetros fisiológicos sin afectar la integridad de la planta. En este trabajo se presenta la implementación de dos técnicas sin contacto para la medición de contenido de agua en hojas, a saber: una solución acústica que emplea técnicas sin contacto para la inducción de ondas a frecuencias ultrasónicas, las cuales interactúan con la estructura interna de las muestras estudiadas. De esto, se establece una relación entre la información acústica y el contenido de agua en las hojas. En la segunda implementación, utilizamos una fuente de luz y un espectrómetro para medir la respuesta a la luz de las hojas en el rango 400 nm – 1000 nm, así como su relación con la variación de la humedad en las muestras. Los resultados de este trabajo pueden tener impacto sobre los métodos tradicionales de la fisiología para estimar propiedades en tejidos vegetales, mejorando los métodos de medición *in situ* de agua, a través de técnicas en línea y sin contacto.

Palabras clave: Contenido relativo de agua, fotónica, tejidos vegetales, ultrasonidos, acústica, hojas de plantas.

Abstract

Dealing with the impacts of climate change is a big challenge nowadays. Water availability around the world is one of the resources more affected by such a change. Besides, water use in agriculture represents almost 70% of the total consumption around the world. By 2050, it is expected that global water consumption may increase 19% in order to feed the growing population. Consequently, there exists a need for improving irrigation methods and systems currently used in crops, along with the instruments used to measure the physiological parameters of plants. In this work we introduce two non-contact implementations to estimate water content on plant leaves: 1) an acoustic method that involves the propagation of mechanical waves at ultrasonic frequencies, which interact with the internal structure of the leaves under study and 2) a photonic



implementation, in which we use a light source and a spectrometer to measure the response of the leaves in the range from 400 nm to 1000 nm and its relationship with the water content of the samples. Experimental results are shown using both methods. This research is expected to propose new alternatives to classical methods used in physiology to estimate properties of vegetable tissues, improving in-situ measurement of water content via on-line and non-contact strategies.

Keywords: Air-coupled ultrasound, photonics, water content, plant leaves, acoustics, vegetable tissue



Wearable para el Monitoreo de la Señal ECG con Electrodo no Convencionales en Pacientes que Padece Enfermedades Cardiovasculares

Wearable for ECG Signal Monitoring with Unconventional Electrodes in Patients Suffering from Cardiovascular Diseases

Andrés Ramiro Osorio Cantor¹, Jaime Eduardo Manchola Romero¹ Juan Sebastián Rubiano Labrador^{1,2}, William Daniel Moscoso Barrera¹

1. Departamento de Ingeniería Electrónica, FICB. Universidad Central. Bogotá, Colombia
y. Autor correspondiente: jrubianol@ucentral.edu.co

Resumen

A través del tiempo, el índice de enfermedades cardiovasculares ha venido en aumento. En nuestro país según el DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas), esta ha sido la principal causa de muerte en el año 2016, registrando 16.076 muertes pertenecientes a cuadros de ataques al corazón y otras enfermedades cardíacas [1]. Es de vital importancia avanzar en el ámbito tecnológico biomédico con el propósito de monitorear y prevenir este tipo de enfermedades cardíacas. En el año 2012 la organización mundial de la salud subrayó que esta fue la causante de un tercio de las muertes a nivel mundial [2], en la actualidad se establecen exámenes para detectar anomalías en el corazón, la mayoría de estos exámenes se realizan mediante el electrocardiograma, debido a que esta es la herramienta de diagnóstico cardiológico más utilizada tanto en el paciente cardíaco como en la población general. El problema que abarcan estos exámenes es que en los centros de salud los electrocardiogramas realizan un registro de la actividad eléctrica del corazón en cortos periodos de tiempo, periodos que no contemplan circunstancias antes o después del registro practicado. Lo que evidencia la falta de un sistema que sea capaz de llevar un monitoreo continuo y que informe de manera completa la actividad eléctrica del corazón del paciente en labores de la vida cotidiana. Actualmente se buscan nuevos dispositivos y metodologías para monitorear pacientes de forma constante, no invasiva y eficiente durante la vida cotidiana, de modo que no afecte la calidad de vida del paciente.

En ocasiones dependiendo del paciente y del delicado estado de salud, se hace necesario un monitoreo constante y prolongado, actualmente existen los dispositivos Holter que registran la actividad eléctrica del corazón durante periodos de 24 a 48 horas, en el mercado también se encuentran los denominados monitores cardíacos implantables como lo es el dispositivo Reveal, pero por el largo tiempo de duración en estos monitoreos los médicos advierten que estos son procedimientos invasivos y que pueden ocasionar molestias y otras complicaciones en los pacientes [3].

Por esta razón el presente trabajo de tiene como objetivo desarrollar un *wearable* que realice monitoreo constante no invasivo en pacientes con enfermedades cardiovasculares, con funcionamiento similar al de un electrocardiógrafo convencional, como también visualizando la señal ECG y la frecuencia cardíaca en una interfaz gráfica desarrollada para un computador. Se busca que este *wearable* permita un monitoreo constante de forma no invasiva empleando telas



conductivas avaladas para detectar y conducir la actividad eléctrica del corazón eliminando el uso de los electrodos convencionales de plata/cloruro de plata Ag/AgCl (electrodos adhesivos), o los electrodos de succión, ya que estas telas no necesitan cintas ni adhesivos para mantenerlos en su lugar. Estas telas conductivas no necesitan de gel conductivo y se integran a una prenda de vestir y un sistema electrónico con el propósito de que el paciente pueda hacer uso diario del *wearable* sin invadir ni afectar las actividades cotidianas de la persona.

Palabras clave: ECG, electrodos, e-textiles, señales bioeléctricas, telas conductivas, wearable.

Abstract

Through time, the rate of cardiovascular diseases has been increasing. In our country, according to DANE (National Administrative Department of Statistics), this has been the main cause of death in 2016, recording 16,076 deaths from heart attacks and other heart diseases [1]. It is of vital importance to advance in the biomedical technological field in order to monitor and prevent this type of heart disease. In 2012 the world health organization stressed that this was the cause of a third of deaths worldwide [2], currently established tests to detect abnormalities in the heart, most of these tests are performed by electrocardiogram, because this is the cardiological diagnostic tool most used in both the cardiac patient and the general population. The problem covered by these tests is that in health centres electrocardiograms record the electrical activity of the heart in short periods of time, periods that do not contemplate circumstances before or after the recording performed. This is evidence of the lack of a system that is capable of continuous monitoring and that fully reports the electrical activity of the patient's heart in everyday tasks. Currently, new devices and methodologies are sought to monitor patients in a constant, non-invasive and efficient way during daily life, so that it does not affect the patient's quality of life.

Sometimes depending on the patient and the delicate state of health, a constant and prolonged monitoring is necessary, currently there are Holter devices that record the electrical activity of the heart for periods of 24 to 48 hours, in the market are also called implantable cardiac monitors as is the Reveal device, but for the long duration in these monitoring doctors warn that these are invasive procedures and can cause discomfort and other complications in patients [3].

For this reason the present work aims to develop a *wearable* that performs constant non-invasive monitoring in patients with cardiovascular diseases, with operation similar to that of a conventional electrocardiograph, as well as visualizing the ECG signal and heart rate in a graphical interface developed for a computer. This *wearable* is intended to allow constant non-invasive monitoring using conductive fabrics endorsed to detect and conduct the electrical activity of the heart by eliminating the use of conventional Ag/AgCl silver chloride electrodes (adhesive electrodes) or suction electrodes, since these fabrics do not need tapes or adhesives to keep them in place. These conductive fabrics do not require conductive gel and are integrated into a garment and electronic system so that the patient can make daily use of the *wearable* without invading or affecting the person's daily activities.

Keywords: Bioelectrical signals, ECG signal, E-textiles, electrodes, conductive fabrics, wearable.



Referencias

- [1] DANE. (Publicado a 30 de marzo del 2016). Informe DANE defunciones no fetales 2015. Cifras con corte a 31 del 2015 . Bogotá.
- [2] Galindo. J. (2011). Guías colombianas de cardiología arritmias ventriculares y muerte súbita. Revista Colombiana de Cardiología. vol 18, suplemento 1.
- [3] Olmos, C., Franco, E., Suárez-Barrientos, A., Fortuny, E., Martín-García, A., Viliani, D., Macaya, C., Pérez De Isla, L. (2014). Wearable wireless remote monitoring system: An alternative for prolonged electrocardiographic monitoring. International Journal of Cardiology, vol. 172, pp. 43–44.



Construcción de un Robot Delta Usando Filtros Mecánicos y Modelo Generalizado de la Dinámica y Geometría

Delta Robot Construction Using Mechanical Filters and Generalized Model of the Dynamics and Geometry

Santiago Restrepo Ruiz^{1,γ}, Edgar A. Gómez G.²

1. Programa de Ingeniería Electrónica, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia

2. Programa de Física, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia

γ. Autor correspondiente: srestrepor_1@uqvirtual.edu.co

Resumen

Los robots Delta [1] son mecanismos rápidos, precisos y con múltiples aplicaciones en medicina [2] y en procesos industriales. Usualmente se diseñan con estructuras rígidas suponiendo que operan en un entorno estático y sin fuertes vibraciones mecánicas. La rigidez estructural restringe la aplicabilidad del mecanismo a entornos industriales estáticos, si el robot está cerca de maquinaria pesada, o dispuesto en escenarios inestables como en aplicaciones aeroespaciales la resolución espacial de los movimientos del efector estaría restringida. Hasta la fecha no hay reporte en la literatura de robots Delta diseñados para operar sometidos a fuertes o rápidas vibraciones mecánicas. En este trabajo se presenta un prototipo de un robot Delta diseñado de tal forma que incorpora filtros mecánicos en las segundas partes de sus extremidades, cuyo objetivo es atenuar las vibraciones mecánicas del medio externo transmitidas al efector (ver Fig. 1), además de un conjunto de amortiguadores pensados para tensionar la correa de transmisión articular. Adicionalmente, en este trabajo se propone una descripción matemática que generaliza la orientación y el número de cadenas cinemáticas en la dinámica y en la geometría. Una mayor cantidad de articulaciones consigue una transmisión de fuerzas al efector más homogéneamente distribuida en todo el volumen radial. Una ventaja del modelo geométrico generalizado es que permite orientar de cualquier dirección al mecanismo sin perder la referencia a la trayectoria. Este modelo generalizado surge como una alternativa a las descripciones típicas que suponen el caso particular del mecanismo que reposa normal a la superficie de la tierra y tiene sólo tres cadenas cinemáticas independientes localizadas cada $2\pi/3[rad]$. Finalmente, en base al modelo dinámico generalizado se construye una estrategia de control para el seguimiento óptimo de trayectorias [3].

Palabras clave: Robot Delta, Filtros Mecánicos, Control de trayectoria...

Abstract

Delta robots [1] are fast, precise mechanisms with multiple applications in medicine [2] and industrial processes. They are usually designed with rigid structures assuming they operate in a static environment and without strong mechanical vibrations. The structural rigidity of the mechanism restricts its applicability to static environments, if the robot is close to heavy machinery, or arranged in unstable scenarios such as aerospace applications, the spatial resolution of the movements of the effector would be restricted. Currently there is no report in the literature of Delta robots designed to operate subjected to strong or rapid mechanical vibrations. This paper presents a prototype of a Delta robot designed in such a way that it incorporates mechanical filters in the second parts of its extremities, and whose objective is to attenuate the mechanical vibrations of the



external medium transmitted to the effector (see Fig. 1), an additional set of spring-dampers is intended to tense the actuated-joint transmission belt. Additionally, this work proposes a mathematical description that generalizes orientation and the number of kinematic chains for dynamics and geometry models. A higher amount of articulations achieves a transmission of forces to the effector more homogeneously distributed throughout the radial volume. An advantage of the generalized geometric model is that it allows the mechanism to be oriented from any direction without losing the reference to the trajectory. This generalized model emerges as an alternative to the typical descriptions that suppose the particular case of the mechanism that rests normal to the surface of the Earth and has only three independent kinematic chains located every $2\pi / 3$ [rad]. Finally, based on the generalized dynamic model, a control strategy is developed to optimally track trajectories [3].

Keywords: Delta Robot, Mechanical Filters, Tracking Control...



Fig. 1, Foto del prototipo construido y esquema elemental de un robot Delta.

Referencias

- [1] R. Clavel. United states of america Patente US4976582A, 1985.
- [2] J. Gudiño-Lau, et. al, "Diseño y modelo cinemático de un robot delta para diagnostico y rehabilitacion," Escuela Superior de Tlahuelilpan, 2018.
- [3] D. S. Naidu, Optimal control systems, Idaho, USA, 1er ed. CRS Press LLC, 1940.



Caraterización de Uniones Adhesivas en Materiales Compuestos con Diferentes Espesores de Unión Sometidas a Cargas Cuasiestáticas e Impactos Cíclicos

Adhesive Bonded Joints Characterization in Composite Materials with Different Adhesive thicknesses under Quasi-Static and Cyclic Impact Loading

Andrés Bautista Villamil^{1, γ}, Juan Pablo Casas Rodríguez¹, Maribel Silva², Alicia Porras³

1. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

2. Departamento de Ingeniería Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

3. Fuerza Aérea Colombiana, Bogotá, Colombia

γ. Autor corresponsal: aa.bautista@uniandes.edu.co

Resumen

El desarrollo de la industria aeronáutica colombiana ha incentivado la investigación en el comportamiento de los materiales que constituyen las aeronaves ante diferentes condiciones de carga que se presentan durante la operación de las mismas. El Calima T-90 es la primer aeronave militar construida en el país, utilizada para el entrenamiento de pilotos de la Fuerza Aérea Colombiana, por lo que puede estar expuesta a situaciones de operación adversas como “hard landings” que generan cargas de impacto, las cuales, al ser repetitivas, pueden producir el fenómeno de fatiga por impacto. La estructura del Calima T-90 es principalmente fabricada por medio de materiales compuestos los cuales generan ensambles y subensambles de los diferentes componentes de esta. El método principal de unión de estos componentes, es el empleo de las uniones adhesivas. Cada tipo de unión adhesiva debe de ser estudiada por sí misma y los resultados obtenidos en algunos ensayos son pocas veces extrapolables a otras configuraciones debido a que el desempeño de la unión adhesiva depende de las condiciones propias del proceso de manufactura y características de operación.

En este contexto surge la necesidad de caracterizar las uniones adhesivas típicas de la aeronave y evaluar el efecto del espesor del adhesivo en el desempeño mecánico de la unión bajo condiciones cuasiestáticas de carga y fatiga por impactos en uniones de traslape simple. Se realiza un análisis de la distribución de esfuerzos a lo largo de la unión que posibilita determinar la variación de modo combinado de carga que se induce debido al momento generado por la excentricidad de la carga. Adicionalmente se hace relevante determinar la influencia del espesor del adhesivo en la tasa de liberación de energía crítica para modo I de carga utilizando una configuración de doble viga en cantiléver. Finalmente un análisis de la superficie de fractura de las probetas permite determinar la magnitud del daño y el tipo de falla que se presenta bajo las 3 condiciones de carga propuestas.

Palabras clave: Fatiga por impacto, materiales compuestos, modo combinado de falla, propagación de grieta, uniones adhesivas, uniones de traslape simple.

Abstract

The Colombian aeronautical industry has stimulated research in the mechanical behavior of materials under different loading conditions aircrafts are generally exposed during its operation. The Calima T-90 is the first military aircraft built in the country, used for primary flight training of Colombian Air Force Pilots; therefore, it may be exposed to adverse operating situations such



as hard landings, which cause impact loads on the aircraft that might produce the impact fatigue phenomenon. The Calima T-90 structure is mainly manufactured by composites materials, generating assemblies and subassemblies of different components of it. The main method of bonding these components is by using adhesive joints. Each type of adhesive bond must be studied on its own since its performance depends on the conditions of the manufacturing process and operating characteristics.

This study aims to characterize the typical adhesive joints of the aircraft under usual loads. To this purpose, the evaluation of the effect of adhesive thickness on the mechanical performance of the joint under quasi-static loading conditions and cyclic impact fatigue using single lap-joint (SLJ) specimens was performed. Additionally, an analysis of the stress distribution in SLJ specimens with different adhesive thicknesses, provide insights into the variation of the mixed mode fracture due to bending moment caused by the eccentricity of applied loading. Furthermore, using a double cantilever beam specimen, the influence of the thickness of the adhesive bonded line on the critical energy release rate for mode I delamination failure was determined. Finally, an analysis of the fracture surface of the test specimens considering the mechanical interaction between the substrate (composite) and the adhesive, allow for an understanding of the magnitude of the damage, the type of failure mechanism that occurs and its correlation with the way crack propagates under the proposed loading conditions.

Keywords: Adhesive bonded Joints, composite materials, crack propagation, impact fatigue, mixed mode fracture, single lap joints.



Calibración de Ruteadora CNC Mediante un Modelo Cuasi-Estático de Error y Fotogrametría Monocular

CNC Router Calibration by Means of a Quasi-Static Error Model and Monocular Photogrammetry

Norbey Grisales G.¹, Sebastián Durango I.^{2, γ}, César A. Álvarez V.², Rubén Darío Flórez H.³

1. Maestría en Sistemas Automáticos de Producción, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia

2. Grupo Diseño Mecánico y Desarrollo Industrial, Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, Colombia

3. Grupo Automática, Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, Colombia

γ. Autor corresponsal: sebastiandi@autonoma.edu.co

Resumen

La precisión y exactitud, que son requerimientos habituales en los procesos de manufactura, están definidas por el contexto de fabricación, tanto desde las especificaciones del proceso como desde el propio sistema de manufactura. En ese contexto la calibración de sistemas electromecánicos contribuye a lograr los requerimientos fabricación. Este trabajo presenta un método de calibración para una ruteadora CNC que opera en un contexto de tolerancias dimensionales lineales ISO 2768-c, lo que corresponde con requerimientos de manufactura para ornamentos, mobiliario, o en general para operaciones de desbaste limitadas a un espacio de trabajo plano en manufactura artesanal. El método de calibración está basado en la estimación de los parámetros de un modelo cinemático con una representación de variaciones dimensionales (lineales y angulares) de la estructura. La estimación de los parámetros se hace a partir de errores de maquinado medidos mediante fotogrametría monocular de un patrón geométrico que registra un mecanizado (taladrado). El patrón, que se muestra en la Fig. 1, tiene doble propósito: permite calibrar el instrumento de medición (cámara digital) y medir la posición del centro de la herramienta mediante la identificación del patrón de huellas de mecanizado en el centro de cada cuadro.

La calibración se implementó compensando el código G (software) de una máquina ruteadora CNC, logrando, para ambos ejes, la reducción de la dispersión de los errores de precisión y disminuyendo el error medio de posicionamiento. Los resultados globales de la calibración, evaluados a través de la norma del error de posicionamiento medido en los 36 puntos del patrón-huella de maquinado, se registran en la Fig. 2.

Cualitativamente se destacan dos aspectos del método propuesto: (i) La facilidad asociada al patrón-huella de maquinado, que permite calibrar el instrumento óptico y estimar los errores de posicionamiento, y (ii) el bajo costo, al no requerir inversiones significativas en instrumentos específicos para la calibración de máquinas herramientas.

Palabras clave: Máquina herramienta, calibración, fotogrametría

Abstract

Precision and accuracy, which are common requirements in manufacturing processes, are defined by the manufacturing context, both from the specifications of the process and from the

manufacturing system itself. In this context, the calibration of electromechanical systems contributes to achieve manufacturing requirements. This paper presents a calibration method for a CNC router that operates in a context of ISO 2768-c linear dimensional tolerances, which corresponds with manufacturing requirements usual in ornaments, furniture, or in a general way with roughing operations that are limited to a planar workspace in hand-crafted manufacture. The calibration method is based on the estimation of the parameters of a kinematic model with a representation of dimensional variations (linear and angular) of the structure. The estimation of the parameters is based on machining errors measured by monocular photogrammetry of a geometric pattern that records a machining (drilling). The pattern, presented in Fig. 1, has a dual purpose: It allows the calibration of the optical sensor (digital camera) and it is used to registry the position of the tool-center by means of the identification of the machining stamp pattern in the center of each square.

The calibration was implemented by means of a G-code compensation on a CNC router machine, thus meeting, for both axes, the reduction of the dispersion of precision errors and decreasing the mean of the positioning error. The global results of the calibration, which were evaluated through the norm of the positioning error measured in the 36 points of the calibration pattern, are registered in Fig. 2.

Two qualitative characteristics of the proposed method are highlighted: (i) The easiness associated to the machining pattern, which allows to calibrate the optical sensor and to estimate the positioning errors, and (ii) the low cost, because it is not necessary to invest in specific machine-tool calibration devices.

Keywords: Machine tool, calibration, simulation models, photogrammetry

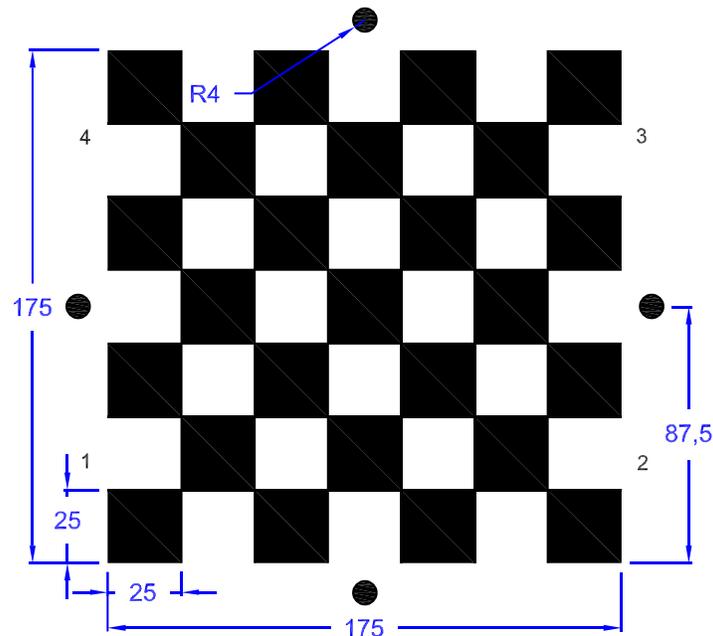


Figura 1. Patrón geométrico para calibración de cámara y medición de errores de posicionamiento [mm].

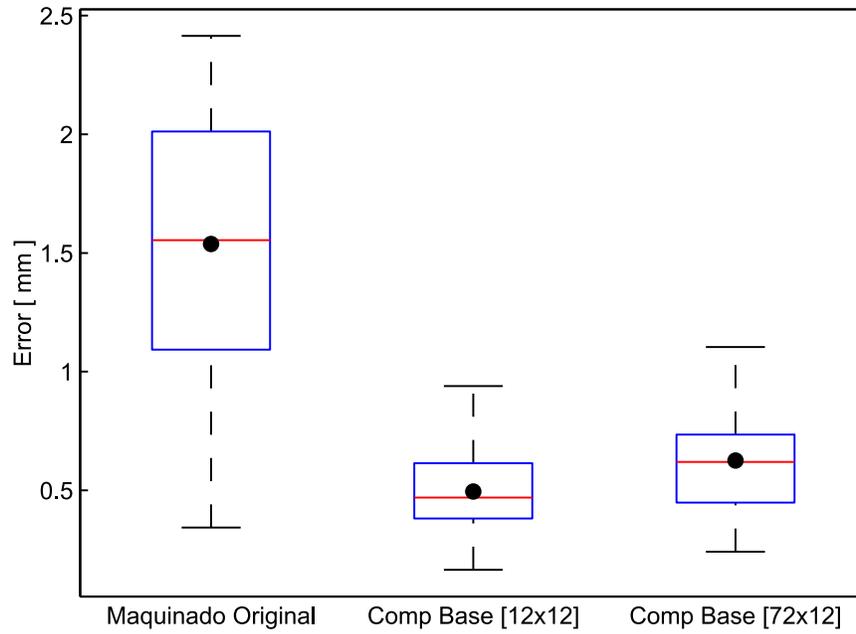


Figura 2. Norma del error antes y después de la calibración cinemática. Se usaron dos registros optimizados de errores de maquinado para estimar 12 parámetros del modelo cinemático.



Implementación de Alternativas Tecnológicas en la Recolección de Aguacate HASS

Implementation of Technological Alternatives in HASS Avocado Harvesting

Leidy Natalia Gaviria Ocampo^{1, γ}, *Alexander López Salgado*², *Olga Lucia Ocampo*³

1. TecnoParque Nodo Manizales, Servicio Nacional de aprendizaje SENA Regional Caldas, Colombia.
2. Grupo de Investigación, Diseño y Desarrollo Aplicado del Centro de Procesos Industriales, Servicio Nacional de Aprendizaje SENA Regional Caldas, Colombia.
3. Departamento de Mecánica y Producción. Universidad Autónoma de Manizales.

γ. Autor correspondal: lgaviriao@sena.edu.co

Resumen

Este proyecto de investigación busca soluciones a las necesidades actuales del sector agrícola, especialmente en la implementación de alternativas tecnológicas en la recolección de aguacate en el departamento de Caldas, ubicado en la en el centro del país. Este fruto ha tomado gran importancia en los últimos años. De acuerdo con Procolombia, las exportaciones mundiales pasaron de USD 1.992 millones en 2012 a USD 4.404 millones en 2016, siendo México (46%), Holanda (14%), Perú (9%), Chile (8%), los principales proveedores del fruto, sumando el 80% de la exportación mundial. Colombia forma parte de los 15 primeros países en exportación desde 2016 y en el 2017 las exportaciones alcanzaron los USD 52 millones, 51% más que en el 2013.

Teniendo en cuenta el crecimiento acelerado del cultivo de aguacate a nivel mundial, se hace necesario analizar los métodos de recolección actuales, conociendo las dificultades que presenta el sector agrícola para implementar alternativas tecnológicas en sus procesos, sobre todo por las condiciones topográficas con las que cuenta el territorio Colombiano. Específicamente en la zona cafetera, donde los cultivos son sembrados en terrenos de ladera, se dificultan todas las operaciones necesarias para mantenerlos en condiciones óptimas y realizar actividades de recolección. Es por esto que ha sido de gran importancia el uso de técnicas de la ingeniería de métodos, con el fin de identificar las actividades llevadas a cabo en el proceso de recolección y así proponer procedimientos estandarizados con los que se eliminen pasos innecesarios, optimizando esta labor.

En este trabajo, se aplicó la metodología Design Thinking para la implementación de diferentes alternativas tecnológicas. Esta metodología es utilizada para el desarrollo de productos, procesos o servicios innovadores, cuyo objetivo principal es solucionar una necesidad insatisfecha entendiendo al usuario final y proponiendo soluciones ajustadas a las necesidades del mismo. En este punto de la investigación y para desarrollar la primera fase de la metodología relacionada con comprender e involucrarse con el usuario se han realizado 4 visitas a fincas ubicadas en los municipios de Manzanares, Marquetalia y Pácora. Estos tres municipios son unos de los mayores productores de Aguacate Hass en el departamento de Caldas, variedad objeto de estudio. En el trabajo realizado en campo se lograron identificar 4 métodos de recolección, estos son:

- Tirón del fruto desde el piso.
- Tiro del fruto desde el árbol.



- Corte por tijera con una persona.
- Corte con tijera con 2 personas.

Además se identificaron las herramientas que se usan actualmente para el desarrollo de su labor, las cuales tienen gran potencial para ser mejoradas y así optimizar el proceso de recolección, teniendo en cuenta las condiciones topográficas ya mencionadas.

Actualmente el proceso de investigación se encuentra en una fase de Análisis de la información recolectada en campo, así como las primeras propuestas para la implementación de herramientas que permitan reducir los tiempos del proceso y optimización del uso de recursos, incluyendo la propuesta de un método estandarizado para la recolección.

Palabras Claves: Aguacate, ingeniería de métodos, metodología design thinking, recolección manual, tecnologías, innovación.

Abstract

This research project seeks solutions to the current needs of the agricultural sector, especially in the implementation of technological alternatives in avocado harvesting in the department Caldas, located in the center of the country. This fruit has taken great importance in recent years; according to Procolombia, world exports went from USD 1,992 million in 2012 to USD 4,404 million in 2016, its main suppliers are Mexico (46% share), Holland (14%), Peru (9%), Chile (8%)), corresponding to 80% of world exports. Colombia became part of these 15 countries in 2016 and in 2017 exports reached 51%, achieving USD 52 million, 40 times more than in 2013.

That said, knowing the accelerated growth of avocado cultivation worldwide, it is necessary to analyze the current collection methods, taking into account the difficulties that the agricultural sector presents to implement technological alternatives in their processes, mostly due to the topographic conditions that the Colombian territory counts with, specifically the coffee zone where their crops are planted in hillside lands, which hinders all the necessary operations to keep them in optimum conditions and carry out harvesting activities. This is why it has been of great importance the use of techniques of method engineering, in order to identify the activities carried out in the collection process and thus propose standardized procedures with which unnecessary steps are eliminated, optimizing this work.

It should also be mentioned that for the implementation of technological alternatives the Design Thinking methodology was applied. This methodology is used for the development of innovative products, processes or services, whose main objective is to solve an unmet need by understanding and putting in the shoes of the final user, proposing solutions adjusted to the needs of those. At this point of the investigation and to develop the first phase of the methodology related to understanding and engaging with the user, it has made 4 visits to farms located in the municipalities of Manzanares, Marquetalia and Pácora, these three municipalities are some of the largest producers of Hass Avocado in the department Caldas, variety under study. In the work carried out in the field, we were able to identify 4 collection methods, these are:

- Fruit pull from the floor.



- Fruit thrown from the tree.
- Cut by scissors with one person.
- Cut by scissors with 2 people.

In addition, the tools currently used for their work performance were identified, which have great potential to be improved and thus optimize the collection process, taking into account the topographic conditions already mentioned. Currently the research process is in an Analysis of information phase collected in the field, as well as the first proposals for the implementation of tools to reduce process times and optimize the use of resources, including the proposal of a collection standardized method.

Keywords: Avocado, engineering methods, methodology design thinking, handpicking, technologies, innovation.



Diseño de un Control PID y un Controlador LQG para un Exoesqueleto de Dos Grados de Libertad

Design of a PID and LQG Control System for an Exoskeleton of Two-Degree-of-Freedom

Alhim Adoná Vera González^{1, γ}, Hernando González Acevedo¹

1. Ingeniería Mecatrónica, Universidad Autónoma de Bucaramanga, Bucaramanga, Colombia
γ. Autor corresponsal: avera488@unab.edu.co

Resumen

El propósito del exoesqueleto es soportar el peso y proveer adicional fuerza y resistencia a un sujeto generando una reducción en el desgaste de los músculos desde actividades diarias hasta situaciones de mayor esfuerzo. Por lo que resulta importante el diseño de mecanismos que auxilien y den soporte a los movimientos cotidianos del ser humano. Las principales aplicaciones son en la medicina, milicia, procesos industriales y en particular se pueden utilizar para rehabilitación de las extremidades. Cuando se refieren a procesos de rehabilitación, se resaltan dos objetivos: primero recuperar la fuerza muscular y segundo, la resistencia, que es la disminución del desgaste de las articulaciones. Para controlar estos sistemas se han empleado diversas técnicas entre las cuales se destaca el regulador proporcional derivativo e integral (PID) [4], [5], [6] que han permitido realizar seguimientos a robots humanoides, ortesis robóticas, robots bípedos, y exoesqueleto. También técnicas como control robusto[8] que garantiza de manera óptima realizar seguimiento a robots SCARA y robots de dos grados de libertad, teniendo en cuenta perturbaciones y variación en los parámetros.

En este artículo se describe el modelo dinámico y el diseño de un sistema de control de un exoesqueleto de dos grados de libertad. Las técnicas de control planteadas son regulador proporcional derivativo e integral (PID), el principio básico del esquema del control PID es que actúa sobre la variable a ser manipulada a través de una apropiada combinación de tres acciones de control: acción de control proporcional (donde la acción de control es proporcional a la señal de error actuante, la cual es la diferencia entre la entrada y la señal de realimentación); la acción de control integral (donde la acción de control es proporcional a la integral de la señal de error actuante) y la acción de control derivativa (donde la acción de control es proporcional a la derivada de la señal de error actuante); la otra técnica de control planteada es Linear Quadratic Gaussian Control (LQG), el controlador LQG es la combinación de una ganancia de realimentación de estados y un estimador de estados, tipo Kalman [12]. Estas técnicas fuerzan al exoesqueleto a seguir con precisión el movimiento real de las piernas y que permite no solo aumentar gradualmente la velocidad en las repeticiones de una secuencia, sino, la extensión de la posición articular, la resistencia o fuerza de oposición de un ejercicio de aumento de fuerza, entre otros. Se utilizó la herramienta de control de Matlab y SIMULINK para realizar los diseños de cada controlador y posteriormente ver el comportamiento del modelo matemático con cada estrategia de control propuesta. Para analizar las dos estrategias de control se realizaron dos pruebas, la primera fue evaluar la respuesta del sistema ante una entrada escalón y se calculan los índices de error IAE, ISE, ITAE e ITSE, la segunda prueba fue simular el movimiento de marcha de una pierna. De los resultados de la simulación se obtiene que el mejor controlador es LQG ya que el sistema en lazo



cerrado presenta un tiempo de establecimiento de 4.56 [s] y 4.79 [s] para la articulación de la rodilla y el tobillo, respectivamente, y con un sobre paso menor del 2.5 % en ambos controladores.

Palabras clave: Exoesqueleto, modelo dinámico, control PID, control LQG.

Abstract

The purpose of the exoskeleton is to support the weight and provide additional strength and resistance to a subject generating a reduction in the degeneration of the muscles from daily activities to situations of greater effort. Therefore, it is important to design mechanisms that help and support the daily movements of the human being. The main applications are in medicine, militia, industrial processes and can be used for rehabilitation of limbs. When referring to rehabilitation processes, two objectives are highlighted: first, to recover muscular strength and second, resistance, which is the reduction of joint wear. To control these systems, several techniques have been used, among which the derivative and integral proportional regulator (PID) [4], [5], [6] stand out, which have allowed the tracking of humanoid robots, robotic orthoses, bipedal robots, and exoskeletons. Techniques such as robust control [8] have also optimally tracked SCARA robots and robots with two degrees of freedom, taking into account disturbances and variation in parameters.

This article describes the dynamic model and design of an exoskeleton control system with two degrees of freedom. The control techniques proposed are derivative and integral proportional regulator (PID). The basic principle of the PID control scheme is that it acts on the variable to be manipulated through an appropriate combination of three control actions: proportional control action (where the control action is proportional to the acting error signal, which is the difference between the input and the feedback signal); the integral control action (where the control action is proportional to the integral of the acting error signal) and the derivative control action (where the control action is proportional to the derivative of the acting error signal), the other proposed control technique is Linear Quadratic Gaussian Control (LQG), the LQG controller is the combination of a state feedback gain and a state estimator, type Kalman [12]. These techniques force the exoskeleton to follow with precision the real movement of the legs and that allows not only to increase gradually the speed in the repetitions of a sequence, but, the extension of the articular position, the resistance or force of opposition of an exercise of increase of force, among others. The control toolbox of Matlab and SIMULINK tools were used to design each controller and then see the behavior of the mathematical model with each proposed control strategy. To evaluate the two control strategies two tests were performed, the first test was to evaluate the response of the system to a step input and calculates the error rates IAE, ISE, ITAE and ITSE, the second test was to simulate the gait movement of a leg. The simulation results show that the best controller is LQG since the closed-loop system has a settling time of 4.56 [s] and 4.79 [s] for the knee and ankle joints, respectively, and with an overpass of less than 2.5 % in both controllers.

Keywords: Exoskeleton, dynamic model, PID controller, LQG controller.



Referencias

- [1] K. O. a. J. F. T. Kikuchi, Leg-robot for demonstration of spastic movements of brain-injured patients with compact magnetorheological fluid clutch, *Advanced Robotics*, vol. 24 no. 16, pp. 671- 686, 2010., 2010.
- [2] B. W. P. K. C. a. C. M. J. Nikitzuk, Active knee rehabilitation orthotic device with variable damping characteristics implemented via an electrorheological fluid, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 15 no. 6, Article ID 5.
- [3] B. N. C. H. Y. a. K. J. P. J. Yoon, A 6- dof gait rehabilitation robot with upper and lower limb connections that allows walking velocity updates on various terrains, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 15 no. 2, pp. 201-215, 201.
- [4] D. C. C. C. Francesco Amato, "Trajectory tracking control of a biomimetic exoskeleton for robotic rehabilitation," in *2017 IEEE 14th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, Calabria, 2017.
- [5] B. W. P. K. C. Jason Nikitzuk, "Active Knee Rehabilitation Orthotic Device With Variable Damping Characteristics Implemented via an Electrorheological Fluid," Boston, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* (Volume: 15, Issue: 6, Dec. 2010), 2009, pp. 952 - 960
- [6] H. Jeakweon, *Bipedal Walking for a Full-sized Humanoid Robot Utilizing Sinusoidal Feet Trajectories and Its Energy Consumption*, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State, 2012.
- [7] G. Partida, V. H. Jaramillo and V. Feliu, "Three-degrees-of-freedom flexible robot position control robust to load changes," *IEEE 15th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETF A 2010)*, 2010, pp. 1 - 6.
- [8] G. Partida, V. H. Jaramillo and V. Feliu, "Three-degrees-of-freedom flexible robot position control robust to load changes," *IEEE 15th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETF A 2010)*, 2010, pp. 1 - 6.
- [9] B. W. P. K. C. Jason Nikitzuk, "Active Knee Rehabilitation Orthotic Device With Variable Damping Characteristics Implemented via an Electrorheological Fluid," Boston, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* (Volume: 15, Issue: 6, Dec. 2010), 2009, pp. 952 - 960.
- [10] J. T. S. S. R. L. R. López, *Desarrollo de un Exoesqueleto para Rehabilitación de Tobillo y Rodilla*, México: Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica, 2014.
- [11] K. Ogata, *Sistema de control en tiempos discretos*, México: Prentice Hall Hispanoamericas, S.A., 2000..
- [12] R. Burns, "Advanced Control Engineering," Ed. Butterworth Heinemann. ISBN 0750651008, 2001, p. 288 – 299.
- [13] R. B. P. C. Padraig Basquel, "Optimal closed-loop transfer functions for non-standard performance indices," in *2017 28th Irish Signals and Systems Conference (ISSC)*, Killarney, 2017.
- [14] T Yan, M. Cempini, C. Oddo, N. Vitiello. Review of assistive strategies in powered lower-limb orthoses and exoskeletons" in *2015*(Volume: 64, February 2017) pp. 120 – 136.



Efecto de la Cáscara de Arroz en la Cementación Sólida del Acero SAE 1020

Effect of the Husk Rice in the Pack Carburizing in the SAE 1020 Mild Steel

Jorge Fredy Llano Martínez^{1, γ}, Eduardo Alberto Pérez Ruiz¹, Alejandra Cárdenas Delgado¹

1. Programa de Ingeniería Mecánica, Universidad de Ibagué, Ibagué, Colombia
γ. Autor correspondiente: jorge.llano@unibague.edu.co

Resumen

La cementación es un tratamiento térmico utilizado para adicionar carbono a la superficie de una pieza de acero, con el fin de obtener elevada dureza y un núcleo o centro lo suficientemente tenaz. Uno de los métodos utilizados para conseguir las características anteriormente mencionadas es la cementación sólida, tratamiento que se lleva a cabo utilizando carbón vegetal o carbón mineral (coque) como sustancias que adicionan carbono a la superficie de la pieza. En este trabajo se realiza el tratamiento térmico de cementación sólida a un acero SAE 1020 (discos de 75 mm de diámetro y 10 mm de espesor) utilizando cáscara de arroz como sustancia aportante de carbono. El tratamiento térmico se llevó a cabo a una temperatura de 950°C con un tiempo de sostenimiento de 7 horas. En la experimentación se realizó cementación con carbón vegetal bajo las mismas condiciones dadas al tratamiento con cáscara de arroz. De manera general, se observa en el análisis microestructural y en las durezas superficiales obtenidas, que el carbón vegetal a diferencia de la cáscara de arroz proporciona mejores características en cuanto al espesor de penetración del carbono y en el logro de una mayor dureza.

Palabras clave: Cementación sólida, acero SAE 1020, cáscara de arroz, dureza.

Abstract

Carburizing is a thermal treatment used to increase the carbon concentration on the surface of sample steel, in order to obtain a high hardness and a toughness core. One of the methods used to achieve these characteristics is the pack carburizing using charcoal or mineral carbon. In this work, the thermal treatment of pack carburizing on the SAE 1020 steel (disks 75 mm in diameter and 10 mm thick) was carried out using rice husk as a carbon source. The heat treatment was carried out at a temperature of 950° C with a soaking time of 7 hours. In addition, the results of the experimentation were compared with the results obtained with the traditional charcoal. In general, were observed through the microstructural analysis and surface hardness that traditional charcoal allowed to obtain the high case depth and hardness.

Keywords: Pack Carburizing, SAE 1020 steel, husk rice, hardness.

Referencias

[1] Li, W, Sun, Z, Zhang, Z, Deng, H, Sakai, T, Influence of case-carburizing and micro-defect on competing failure behaviors of Ni–Cr–W steel under gigacycle fatigue, *International Journal of Fatigue*, n° 72, pp. 66–74, 2015.

[2] Alias, S.K, Abdullah, B, Jaffar, Ahmed, Latip, S.A, Kasolang, S, Izham, M.F, Ghania Abd, M.A, Mechanical properties of paste carburized ASTM A516 steel, *Procedia Engineering*, n° 68, pp. 525 – 530, 2013.



- [3] Sujita, Soenoko, R, Siswanto, E, Widodo, T.D, Study on Fatigue Strength of Pack Carburizing Steel SS400 with Alternative Carburizer Media of Pomacea Canalikulata Lamarck Shell Powder, *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 13, n° 11, pp. 8844-8849, 2018.
- [4] Giordani, T, Clarke, T.R, Kwietniewski C.E.F, Aronov, M.A, Kobasko, N.I, Totten, G.E, Mechanical and Metallurgical Evaluation of Carburized, Conventionally and Intensively Quenched Steels, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 22, pp. 2304-2313, 2013.
- [5] Walvekar, A.A, Sadeghi, F, Rolling contact fatigue of case carburized steels, *International Journal of Fatigue*, n° 95, pp. 264–281, 2017.
- [6] Lv, Y. H, Gai, D. Y, Song, Y. Q, Ma, X. Q, Effect of carburizing and shot peening on the microstructure and surface properties of 17-CrNi6-Mo steel, *Strength of Materials*, Vol. 47, n° . 1, pp. 47-51, 2015.
- [7] Oluwafemi, O.M, Oke, S.R, Otunniyi, I.O, Aramide, F.O, Effect of carburizing temperature and time on mechanical properties of AISI/SAE 1020 steel using carbonized palm kernel Shell, *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, n° 27, pp. 41-56, 2015.
- [8] Putra Negara, D, Muku, I.D, Sugita, I.K, Astika, I.M, Mustika, I.W, Prasetya, D.G, Hardness distribution and effective case depth of low carbon steel after pack carburizing process under different carburizer, *Applied Mechanics and Materials*, vol. 776, pp. 201-207, 2015.
- [9] Putra Negara, D, Muku, I.D, Carburized low carbon steel by use of the coconut midrib charcoal mixed with barium carbonate, *Journal of Materials Engineering and Processing Technology*, vol. 1, n° 1, pp. 11-14, 2017.
- [10] Istiroyah, Pamungkas, M. A, Saroja, G, Ghufron, M, Juwono, A. M, Characteristic of low temperature carburized austenitic stainless Steel, *International Conference on Chemistry and Material Science (IC2MS) 2017*.
- [11] Ihom, A.P, Nyior, G.B, Alabi, O.O, Según, S, Nor Iv,J, Ogbodo, J, The potentials of waste organic materials for surface hardness improvement of mild Steel, *International Journal of Scientific & Engineering Research (IJSER)*, Vol. 3, n° 11, pp. 1-20, 2012.
- [12] Ihom, A.P. Case hardening of mild steel using cowbone as energizer, *African Journal of Engineering Research*, Vol. 1, n° 4, pp.97-101, 2013.
- [13] Darmo, S, Soenoko, R, Siswanto, E, Widodo, T.D, Study on mechanical properties of pack carburizing SS400 steel with energizer pomacea canalikulata lamarck shell powder, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, vol.9, n° 5, pp. 14-23, 2018.
- [14] Arthur, E.K, Ampaw, E, Zebaze Kana, M.G, Akinluwade, K.J, Adetunji, A.R, Adewoye, O.O, Soboyejo W.O. Indentation size effects in pack carbo-nitrided AISI 8620 steels, *Materials Science and Engineering A*. n° 644, pp. 347-357, 2015.
- [15] P.L. Mangonon, *The principles of Materials selection for engineering design*, first ed., Prentice Hall, 1999.



Exponente de Escala de las Funciones de Estructura Longitudinales y Transversales en Turbulencia Homogénea e Isotrópica Generada en un Túnel de Viento

Scale Exponents of Longitudinal and Transverse Structure Functions in Homogeneous and Isotropic Turbulence Generated in a Wind Tunnel

Laura I. Velásquez^{1,2,γ}

1. Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.
2. Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia.

γ, Autor corresponsal: lvelas30@eafit.edu.co – lisabel.velasquez@udea.edu.co

Resumen

Usando una malla activa estilo Makita [1] y una malla pasiva [2] fue caracterizado un flujo turbulento homogéneo e isotrópico con cero de velocidad media estudiando sus funciones de estructura longitudinal $\langle \Delta u(x)^n \rangle = \langle (u(x+r) - u(x))^n \rangle$ y transversales, $\langle \Delta u(y)^n \rangle = \langle (u(y+r) - u(y))^n \rangle$ y $\langle \Delta v(x)^n \rangle = \langle (v(x+r) - v(x))^n \rangle$ donde r es la distancia de separación entre dos puntos de medición dentro del rango inercial, u es la fluctuación de velocidad longitudinal y v es la fluctuación de la velocidad transversal en función del número de Reynolds $R_\lambda = \sqrt{\langle u^2 \rangle} \lambda / \nu$, donde ν la viscosidad cinemática y λ la microescala de Taylor, para órdenes, n , entre 2 y 8. Para la turbulencia homogénea e isotrópica, Kolmogorov estableció en su teoría K41 [3] que la relación entre las funciones de estructura y r podía representarse siguiendo una ley de potencias:

$$\langle \Delta u(x)^n \rangle \sim r^{\xi_{u(x)}^n} \quad (1)$$

Donde $\xi_{u(x)}^n$ es el exponente de escala de la función de estructura longitudinal $\Delta u(x)^n$ de orden n . El rango inercial corresponde a longitudes donde la viscosidad y la tasa de difusividad son despreciables, $L \gg r \gg \eta$, siendo η la escala disipativa y L es la escala integral (escala donde la energía es inyectada). Kolmogorov supuso además que como la tasa de disipación, ϵ , permanecía constante en este rango, existía una dependencia lineal entre los exponentes de escala y el orden de la función de estructura, $\xi_{u(x)}^n = n/3$. Sin embargo, existe una diferencia significativa entre su predicción y los resultados experimentales. Estas diferencias o desviaciones respecto de esa forma lineal se conocen como intermitencia de la turbulencia a pequeña escala.

Es posible también con la descripción de Kolmogorov, el cálculo de las exponentes de las funciones de estructura transversales: $\xi_{v(x)}^n$ y $\xi_{u(y)}^n$.

La turbulencia fue generada en un túnel de viento horizontal, de succión y de circuito abierto de 91×91 cm² de sección transversal y 9,14 m de longitud ubicado en la facultad de Ingeniería Mecánica y Aeroespacial de la universidad de Cornell, en Ithaca, Estados Unidos. El campo de velocidades fue medido con anemometría de hilos calientes en 17 diferentes posiciones, o puntos de monitoreo, a lo largo de túnel usando anemómetros de temperatura constante Dantec 55M01. Para la adquisición de datos fueron usados dos tipos de hilos calientes: sensor unidimensional TSI



1210 y sensor bidimensional TSI 1241 ambos fabricados de manera manual con hilos de aleación de platino y rodio (al 10%) de 2,54 μm de diámetro.

Los exponentes de escala fueron calculados usando el método ESS, por sus siglas en inglés *Extended Self Similarity*, propuesto por Benzi et al. [3], que permite el cálculo de los exponentes graficando la función de estructura de tercer orden en la abscisa frente a la función de estructura de cualquier otro orden en la ordenada. Las figuras 1, 2 y 3 muestran los exponentes de escala $\xi_{v(x)}^n$, $\xi_{u(x)}^n$ y $\xi_{u(y)}^n$ graficados en función del orden n , junto con los exponentes de escala de la teoría K41.

Los resultados indicaron que los exponentes de escala varían en función de R_λ , cuanto más aumentaba R_λ mayor era la diferencia entre los exponentes de las funciones de estructura y los exponentes predichos por la teoría de Kolmogorov sobre turbulencia formulada en 1941 [4]. Se observa claramente de las figuras que el alejamiento respecto a la línea K41 es variable también con el orden n considerado, cuanto más aumenta el orden más se aleja el exponente de escalamiento de la predicción de Kolmogorov y es aún mayor la diferencia con respecto a K41 para el exponente de escalamiento transversal $\xi_{v(x)}^n$, que toma valores significativamente menores que los exponentes $\xi_{u(x)}^n$ y $\xi_{u(y)}^n$. Los exponentes de escala orden 2 y 4 parecen ser independientes del número de Reynolds y del tipo de malla, porque los valores obtenidos para estos órdenes no tienen diferencias significativas apreciables en los seis experimentos realizados. Los exponentes $\xi_{u(y)}^n$ sólo fueron medidos en malla activa.

Palabras clave: Turbulencia isotrópica, función de estructura, malla pasiva, malla activa, anemometría de hilos calientes, túnel de viento.

Abstract

Using a Makita-style active grid [1] and a passive grid [2], a homogenous and isotropic turbulent flow with zero velocity was characterized by studying its longitudinal structure functions $\langle \Delta u(x)^n \rangle = \langle (u(x+r) - u(x))^n \rangle$ and transverse, $\langle \Delta u(y)^n \rangle = \langle (u(y+r) - u(y))^n \rangle$ and $\langle \Delta v(x)^n \rangle = \langle (v(x+r) - v(x))^n \rangle$ where r is the separation distance between two measurement points within the inertial range, u is the longitudinal velocity fluctuation and v is the fluctuation of the transverse velocity as a function of the Reynolds number $R_\lambda = \sqrt{\langle u^2 \rangle} \lambda / \nu$, where ν the kinematic viscosity and λ the Taylor microscale, for orders, n , between 2 and 8. For the homogeneous and isotropic turbulence, Kolmogorov established in his theory K41 [3] that the relationship between the functions of structure and r could be represented by a power law:

$$\langle \Delta u(x)^n \rangle \sim r^{\xi_{u(x)}^n} \quad (1)$$

Where $\xi_{u(x)}^n$ is the scale exponent of the longitudinal structure function $\Delta u(x)^n$ of order n . The inertial range corresponds to lengths where the viscosity and the diffusivity rate are negligible, $L > r \gg \eta$, where η is the dissipative scale and L is the integral scale (scale where the energy is injected). Kolmogorov further assumed that the dissipation rate, ϵ , remained constant in this range thus there was a linear dependence between the scale exponents and the order of the structure function, $\xi_{u(x)}^n = n/3$. However, there is a significant difference between their prediction and the experimental results. These differences or deviations from this linear form are known as



intermittence of small-scale turbulence. It is also possible with the description of Kolmogorov, the calculation of the exponents of the transverse structure functions: $\xi_{v(x)}^n$ and $\xi_{u(y)}^n$.

The turbulence was generated in a horizontal, suction and open-circuit wind tunnel measuring $91 \times 91 \text{ cm}^2$ in cross-section and 9,14 m in length located in the Department of Mechanical and Aerospace Engineering of Cornell University, Ithaca, The United States. The velocity field was measured with hot wires anemometry in 17 different positions, or monitoring points, along the tunnel using Dantec 55M01 constant temperature anemometers. For the acquisition of data two types of hot wires were used: one-dimensional sensor TSI 1210 and two-dimensional sensor TSI 1241 both manufactured manually with platinum and rhodium alloy wires (10%) of 2.54 μm diameter.

The scale exponents were calculated using the ESS method (*Extended Self Similarity*), proposed by Benzi et al. [3], which allows the calculation of exponents by plotting the structure function of third order on the abscissa versus the structure function of any other order on the ordinate. Figures 1, 2 and 3 show the scale exponents $\xi_{v(x)}^n$, $\xi_{u(x)}^n$ y $\xi_{u(y)}^n$ plotted according to the order n, together with the exponents of scale of the K41 theory.

The results indicated that the exponents of scale vary according to R_λ , when R_λ increases the difference between the exponents of the structure functions and the exponents predicted by the K41 theory [4] increases. It is clearly seen from the figures that the distance with respect to the line K41 is also variable with the order n considered, if n increases the difference between the exponents of the structure functions and the exponents predicted by the K41 theory also increases, this difference is even greater for the exponent of transverse scaling $\xi_{v(x)}^n$, which takes significantly smaller values than the exponents $\xi_{u(x)}^n$ and $\xi_{u(y)}^n$. The exponents of order 2 and 4 scale appear to be independent of the Reynolds number and the mesh, because the values obtained for these orders have no significant differences in the six experiments performed. The exponents $\xi_{u(y)}^n$ were only measured in active mesh.

Keywords: Isotropic turbulence, structure function, passive grid, active grid, hot wire anemometry, wind tunnel.

Referencias

- [1] H. Makita and K. Sassa. Active turbulence generation in a laboratory wind tunnel. In *Advances in Turbulence 3*, pages 497–505. Springer, 1991.
- [2] J. Isaza, R. Salazar and Z. Warhaft. On grid-generated turbulence in the near-and far field regions. *Journal of Fluid Mechanics*, 753:402–426, 2014.
- [3] R. Benzi, S. Ciliberto, R. Tripiccion, C. Baudet, F. Massaioli, and S. Succi. Extended self-similarity in turbulent flows. *Physical review E*, 48(1):R29, 1993.
- [4] A.K. Kolmogorov. Dissipation of energy in locally isotropic turbulence. In *Akademiia Nauk SSSR Doklady*, volume 32, page 16, 1941.

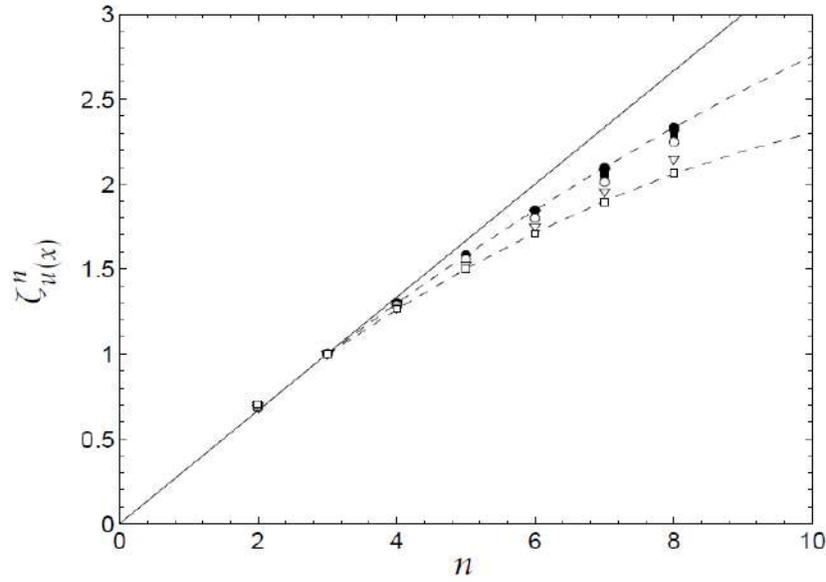


Figura 1. Exponentes de escalamiento $\xi_{u(x)}^n$ en función del orden n . Los símbolos son: ●, malla pasiva $U_0 = 3$ m/s con $R_\lambda = 111$ en $x/M = 44,75$; ▼, malla pasiva $U_0 = 6$ m/s con $R_\lambda = 167$ en $x/M = 44,75$; ■, malla pasiva $U_0 = 12$ m/s con $R_\lambda = 228$ en $x/M = 44,75$; ○, malla activa $U_0 = 3$ m/s con $R_\lambda = 385$ en $x/M = 45,97$; ▽, malla activa $U_0 = 6$ m/s con $R_\lambda = 638$ en $x/M = 45,97$; □, malla activa $U_0 = 9$ m/s con $R_\lambda = 868$ en $x/M = 45,97$. La línea sólida representa la predicción K41 y las líneas punteadas son las líneas de tendencia para los exponente de escalamiento correspondientes al menor y mayor número de Reynolds

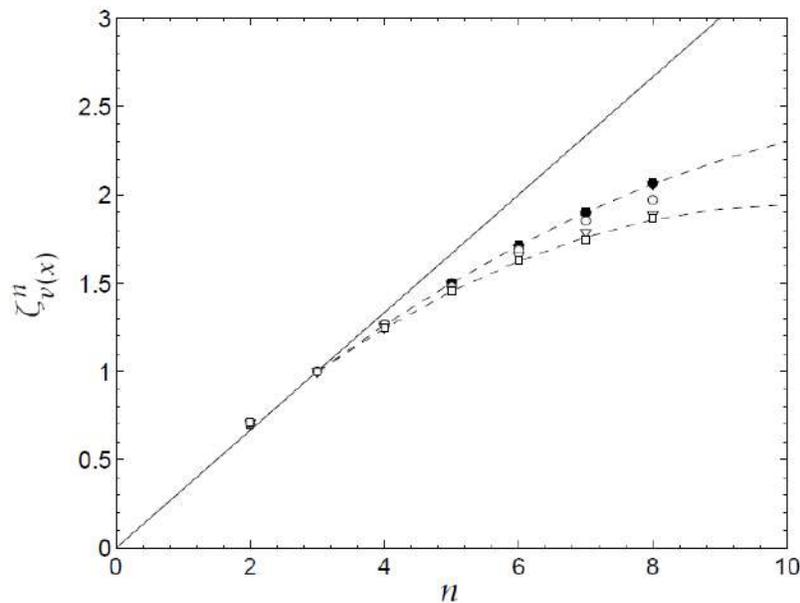


Figura 2. Exponentes de escalamiento $\xi_{v(x)}^n$ en función del orden n . Los símbolos son: ●, malla pasiva $U_0 = 3$ m/s con $R_\lambda = 111$ en $x/M = 44,75$; ▼, malla pasiva $U_0 = 6$ m/s con $R_\lambda = 167$ en $x/M = 44,75$; ■, malla pasiva $U_0 = 12$ m/s con $R_\lambda = 228$ en $x/M = 44,75$; ○, malla activa $U_0 = 3$ m/s con $R_\lambda = 385$ en $x/M = 45,97$; ▽, malla activa $U_0 = 6$ m/s con $R_\lambda = 638$ en $x/M = 45,97$; □, malla activa $U_0 = 9$ m/s con $R_\lambda = 868$ en $x/M = 45,97$. La línea sólida representa la predicción K41 y las líneas punteadas son las líneas de tendencia para los exponente de escalamiento correspondientes al menor y mayor número de Reynolds

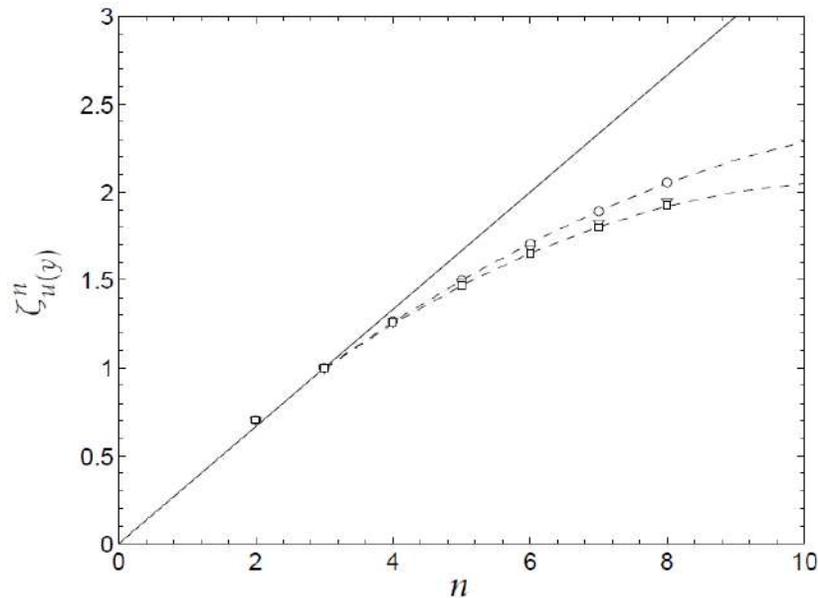


Figura 3. Exponentes de escalamiento $\xi_{u(y)}^n$ en función del orden n . Los símbolos son: ●, malla pasiva $U_0 = 3$ m/s con $R_\lambda = 111$ en $x/M = 44,75$; ▼, malla pasiva $U_0 = 6$ m/s con $R_\lambda = 167$ en $x/M = 44,75$; ■, malla pasiva $U_0 = 12$ m/s con $R_\lambda = 228$ en $x/M = 44,75$; ○, malla activa $U_0 = 3$ m/s con $R_\lambda = 385$ en $x/M = 45,97$; ▽, malla activa $U_0 = 6$ m/s con $R_\lambda = 638$ en $x/M = 45,97$; □, malla activa $U_0 = 9$ m/s con $R_\lambda = 868$ en $x/M = 45,97$. La línea sólida representa la predicción K41 y las líneas punteadas son las líneas de tendencia para los exponente de escalamiento correspondientes al menor y mayor número de Reynolds

Agradecimientos

El autor está agradecido con Zellman Warhaft por su acompañamiento y guía para la realización de la fase experimental; gracias también a Juan Camilo Isaza quien como asesor compartió su conocimiento y experiencia para llevar cabo esta investigación; además quiere dar las gracias a la facultad de Ingeniería Mecánica y Aeroespacial de la Universidad de Cornell por proveer los recursos e instalaciones necesarias para llevar a cabo cada uno de los experimentos; la Universidad EAFIT por su constante interés y apoyo en el desarrollo de esta investigación y la Universidad de Antioquia por la motivación para el desarrollo de este estudio.



Estudio del Grado de Endurecimiento y Resistencia al Desgaste por Deslizamiento del Acero AISI 1045 Endurecido por Temple con Refrigerante Automotriz y para Mecanizado

Study of Hardening and Wear Resistance of the AISI 1045 Steel Quenched with Automotive and Machining Coolant

Joan Santiago Ravagli Reyes, Eduardo A. Pérez Ruiz^γ, Jorge F. Llano Martínez

Programa de Ingeniería Mecánica, Universidad de Ibagué, Ibagué, Colombia

γ. Autor correspondiente: eduardo.perez@unibague.edu.co

Resumen

Para mejorar las propiedades mecánicas de los aceros es utilizado el tratamiento térmico de temple, de esta forma se mejora la dureza, la resistencia a la tracción y la por consiguiente se espera que la resistencia al desgaste. Este trabajo se enfoca en estudiar la resistencia al desgaste del acero AISI 1045 templado en agua, en refrigerante para motor de vehículo y en refrigerante para mecanizado. Los temple fueron realizados en discos de 76,2 mm de diámetro y 8 mm de espesor. Los temple se realizaron en un horno eléctrico a temperatura de austenización de 870°C y tiempo de sostenimiento de 50 minutos. Los medios de enfriamientos utilizados fueron, agua, refrigerante automotriz Quallitor, y tres mezclas de refrigerante para mecanizado, en este caso Solubeg, (10% refrigerante – 90% agua, 30% refrigerante – 70% agua y 50% refrigerante – 50% agua). Los resultados obtenidos indican que en todos los aceros templados el coeficiente de fricción fue inferior en comparación al disco en estado comercial. Igualmente se evidenció que la tasa de desgaste fue alta en los aceros de mayor dureza. Finalmente, se encontró que aceite de mecanizado en mezcla con agua permite obtener dureza intermedia, coeficiente de fricción intermedio y baja pérdida de masa.

Palabras clave: Acero AISI 1045, Medios de temple, Resistencia al desgaste

Abstract

In order to improve the mechanical properties of the steels, the quenching heat treatment is used, in this way the hardness, the tensile strength and consequently the wear resistance are increased. This work focuses on studying the wear resistance of AISI 1045 steel quenched in water, in coolant for vehicle engine and in coolant for machining. The samples were made in 76.2 mm diameter and 8 mm thick discs. The quenching's were carried out in an electric furnace at an austenitization temperature of 870° C and a holding time of 50 minutes. The cooling media used was, water, Quallitor automotive coolant, and three coolant mixtures for machining, in this case Solubeg, (10% coolant - 90% water, 30% coolant - 70% water and 50% coolant - 50% water). The results indicated that in all quenched steels the coefficient of friction was lower compared to the material in commercial state. It was also evident that the wear rate was high in the harder steels. Finally, it was evidenced that machining oil mixed with water allows to obtain intermediate hardness, intermediate coefficient of friction and low mass loss.

Keywords: AISI 1045 steel, Quenching media, Wear resistance

Referencias

[1] Apraiz Barreiro. José, “Tratamientos térmicos de los aceros”, Madrid: s.l. Inversiones editoriales dossat-2000, 2002.



- [2] Kobasko, N., “Effect of accuracy of temperature measurement on determination of heat transfer coefficient during quenching in liquid media”, *Journal of ASTM International*, vol. 9, no.2, 2011, pp. 1-12
- [3] Aronov, M., Kobasko, N., Powell, J., “Practical applications of intensive quenching methods”, *proc. 5th IASME/WSEAS int. Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment, Athens Greece, 2007*, 160-166.
- [4] Otero, R., Canale, L., and Totten, G. “Use of vegetable oils and animal oils as steel quenchants: A historical review-1850-2010”. *Journal of ASTM International*, vol. 9, 2012, pp.1-38
- [5] Civera, C., Rivolta, B., Simencio-Otero, R., Lucio, J.G., Totten, G., and Canale, L. “Vegetable oils as quenchants for steel: residual stresses dimensional changes”. *Materials performance and characterization*, 2014, pp. 1-21
- [6] Adeyemi, M.B., and Adedayo, S.M., “Vegetable oils as quenchants for hardening medium carbon Steel”. *Journal of applied science and technology*, vol. 14, 2009, pp. 74-78
- [7] Criollo Camacho. M.X., “Estudio del temple en el acero utilizando grasas”, *Universidad Técnica de Ambato, Ambato-Ecuador*, 2011.
- [8] Ndaliman, M.B., “An assessment of mechanical properties of medium carbon steel under different quenching media”, *A.U. Journal of Technology*, vol. 10, N. 2, pp. 100-104, 2006.
- [9] de Souza, E.C., Friedel, O., Luiz, F., Totten, G., Canale L., “Quenching and heat transfer properties of aged and unaged vegetable oils”, *Journal of petroleum science research*, vol. 2, N 1, pp. 41-47, 2013.
- [10] Pérez Ruiz, E.A., Galeano A., Negrín Hernández. L., “Evaluación de la dureza y microestructura del acero 1045 templado en sustancias refrigerantes no tradicionales”, *Scientia et Technica* año xxi, vol. 21, N° 3, pp. 213-218, 2016.
- [11] Charadia, R., Regis, M., Dalibon, E., Brühl, S.P. “Comportamiento al desgaste de un acero SAE 1045, templado por inducción posterior a la nitruración iónica”. *15° Congreso Internacional de Metalurgias y Materiales, Concepción, Chile*, 2015.
- [12] ASTM G-99, “Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus”, *ASTM International*, 2010.



A Low-Cost and Scaled Automation System for Education in Industrial Automation

Alejandro Mejía^{1, γ}, Giacomo Barbieri¹

1. Department of Mechanical Engineering, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
γ. Corresponding author: a.mejia13@uniandes.edu.co

Abstract

Modern automation systems consist of assemblies of mechanical and electrical components commanded through digital controllers. The physical implementation of automation systems in education is difficult due to the current costs of industrial automation hardware. This constrains automation courses to only theoretical and/or virtual activities. This paper proposes the implementation of a scaled automation system through the mixing of industrial and prototype hardware. The defined low-cost architecture allows students to practically experience fundamental concepts of industrial automation as PLC code design and verification, SCADA development, and system remote control.

Keywords: Industrial automation, Scaled Automation System, Education, Design Pattern, Prototype Hardware

References

- [1] M. P. Groover, *Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems*, John Wiley & Sons, 2007.
- [2] F. Lamb, *Industrial automation: hands on*, McGraw Hill Professional, 2013.
- [3] K. Schulz, "Human-machine interface system and method for remotely monitoring and controlling a machine". U.S. Patent 10/755,170, 2005.
- [4] L. Monostori, "Cyber-physical production systems: roots, expectations and R&D challenges," in *Procedia Cirp*, 2014.
- [5] F. Harashima, M. Tomizuka and T. Fukuda, "Mechatronics- What Is It, Why, and How?," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1996.
- [6] F. Wagner, *Modeling software with finite state machines: a practical approach*, CRC Press, 2006.
- [7] G. Adzic, *Specification by example: how successful teams deliver the right software*, Manning Publications Co., 2011.



- [8] K. H. John and M. Tiegelkamp, . IEC 61131-3: programming industrial automation systems: concepts and programming languages, requirements for programming systems, decision-making aids, Springer Science & Business Media, 2010.
- [9] G. C. Buttazzo, Hard real-time computing systems: predictable scheduling algorithms and applications, Springer Science & Business Media, 2011.
- [10] A. Dunning, Introduction to programmable logic controllers, Cengage Learning, 2005.
- [11] G. Barbieri, R. Borsari and C. Fantuzzi, "Configuring the deployment into software-based controllers through hierarchical simulations," in *IFAC-PapersOnLine*, 2017.
- [12] A. D'Ausilio, "Arduino: A low-cost multipurpose lab equipment," *Behavior research methods*, 2012.
- [13] S. C. Park, C. M. Park and G.-N. Wang, "A PLC programming environment based on a virtual plant," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008.
- [14] G. Reinhart and G. Wünsch, "Economic application of virtual commissioning to mechatronic production systems," *Production engineering*, 2007.
- [15] P. Hoffmann, R. Schumann, T. M. Maksoud and G. C. Premier, "Virtual Commissioning of Manufacturing Systems," in *24th European Conference on Modelling and Simulation*, 2010.
- [16] B. Min, K. Huang, Z. Pasek, Z. Yip-Hoi, D. Husted and S. Marker, "Integration of real-time control simulation to a virtual manufacturing environment," *Journal of advanced manufacturing systems*, 2002.
- [17] Y. Kuang, "Communication between PLC and Arduino based on Modbus protocol," in *Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC)*, 2014.
- [18] M. Kajan, J. Šovčík, F. Duchoň, L. Mrafko, M. Florek and P. Beňo, "Sensoric subsystem of automated guided vehicle: TCP communication between SIMATIC S7 PLC and Arduino," in *Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD)*, 2014.
- [19] H. Rahadian, W. Nugroho and D. N. Izzhati, "Siemens CPU1215C Input Expansion and Remote Monitoring with Arduino Bridge," *6th International Annual Engineering Seminar (InAES)*, p. 6, 2016.
- [20] A. Moallim and J.-M. K. D.-S. Lee, "Wireless Control and Monitoring using Programmable Logic Controller (PLC)," *17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2017)*, p. 5, 2017.
- [21] A. Berson, "Client-server architecture," McGraw-Hill, 1992.



Implementación de un Sistema de Control para Regular la Velocidad y Posición de Motores Industriales Utilizando el Protocolo de Comunicación OPC

Implementation of a Control System for Regulate the Speed and Position of Industrials Motors Using the OPC Communication Protocol

Hernando González Acevedo¹, Olmer Giovanni Villamizar Galvis¹

1. Grupo de Investigación de Control y Mecatrónica, Universidad Autónoma de Bucaramanga, Bucaramanga, Colombia
γ, Autor correspondiente: hgonzalez7@unab.edu.co

Resumen

El artículo presenta la implementación del protocolo de comunicación OPC (Object Linking and Embedding for Process Control) entre el software matemático, Matlab, y la plataforma de programación gráfica, LabView, para enlazarlos con dos controladores lógicos programables – PLCs, Siemens S7-300 y Allen Bradley ControlLogix 5566, y una estación de trabajo Festo. En cada programa se implementaron tres técnicas de control (PID, lógica difusa y LQG), para regular la velocidad de un motor AC acoplado a un generador DC y controlar la posición de un servomotor industrial, marca Rockwell. Se analiza el tiempo de respuesta que se obtiene con cada enlace de comunicación, así mismo las ventajas de la comunicación OPC y de cada software. De los resultados de las simulaciones se concluye que el software de Labview no garantizaba una tasa de muestreo constante, para periodos de muestreo inferior a 0.5 sg, esto se debe a que la programación se realiza por bloques y se forman rutinas internas que consumen más tiempo. Para aplicaciones con tiempo de establecimiento del orden de minutos, por ejemplo, controles de temperatura, LabView es una herramienta útil porque su ambiente de programación es amigable para el diseño de la interfaz HMI.

Palabras clave: Protocolo OPC, Control PID, Control LQG, Controlador difuso

Abstract

The article presents the implementation of the OPC communication protocol (Object Linking and Embedding for Process Control) between the mathematical software, Matlab, and the graphic programming platform, LabView, to link them with two programmable logic controllers - PLCs, Siemens S7-300 and Allen Bradley ControlLogix 5566, and a workstation Festo. In each program, three control techniques (PID, fuzzy logic and LQG) were implemented to regulate the speed of an AC motor coupled to a DC generator and to control the position of an industrial servomotor, Rockwell. The response time obtained with each communication link was analyzed, as well as the advantages of OPC communication and each software. Of the simulations was concluded that the Labview software did not guarantee a constant sampling rate, for sampling periods of less than 0.5 sg, this is because the programming is done in blocks, generating internal routines that consume more time. For applications with set time of the order of minutes, for example, temperature controls, LabView is a useful tool because its programming environment is friendly to the design of the HMI interface.



Keywords: OPC protocol, PID controller, LQG controller, Fuzzy controller

Referencias

- [1] Zamarreño, Jesús Maria. “Acceso a datos mediante OPC”. Editorial Andavira. 2010. ISBN 9788484085652.
- [2] A. Lakshmi; B. Sangeetha; A. Naveenkumar; Balaji Ganesh; N. Bharathi. “Experimental Validation of PID Based Cascade Control System through SCADA-PLC-OPC Interface”. International Conference on Computer Communication and Informatics. 2012. DOI: 10.1109/ICCCI.2012.6158893.
- [3] Zhang Lieping; Zeng Aiqun; Zhang Yunsheng. “On Remote Real-time Communication between MATLAB and PLC Based on OPC Technology”. Chinese Control Conference. 2007. DOI: 10.1109/CHICC.2006.4346760
- [4] Tushar V. Bhaskarwar; Shripad S Giri; R. G. Jamakar. “Automation of shell and tube type heat exchanger with PLC and LabVIEW”. International Conference on Industrial Instrumentation and Control (IIC). 2015. DOI: 10.1109/IIC.2015.7150859
- [5] Stallings, William. “Comunicaciones y redes de computadores”. Editorial Prentice Hall. 2000. ISBN 9788420529868
- [6] K. Ogata. “Sistemas de control en tiempo discreto”. Editorial Prentice Hall, 1996. ISBN 9789688805398
- [7] Xin-lan Li; Jong-Gyu Park; Hwi-Beom Shin. “Comparation and Evaluation of Anti-Windup PI Controllers ”. Journal of Power Electronics, Vol. 11 No 1, 2011.
- [8] Leonardo J. Marín, Víctor M. Alfaro. “Sintonización de controladores por ubicación de polos y ceros”. IEEE CONESCAPAN XXVI, 2007.
- [9] Roland S. Burns. “Advanced Control Engineering”. Editorial Butterwoth Heinemann. 2001. ISBN 0750651008.
- [10] Pedro Ponce. “Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería”. Editorial Marcombo S.A. 2011. ISBN 9788426717061
- [11] Matlab Toolbox OPC guide. Obtenido de: <https://www.mathworks.com/products/opc.html>, el día 5 de enero de 2017.
- [12] National Instruments. Conecte LabVIEW a Cualquier PLC. Obtenido de <http://www.ni.com/white-paper/7906/es/>, el día 5 de enero de 2017.



EXPRO: Exoesqueleto para Rehabilitación de Miembro Superior

EXPRO: Exoskeleton for Upper Limb Rehabilitation

Juan Pablo Flórez Suárez^γ, Cristian Camilo García Urueña¹, Diego Fernando Flórez Rodríguez¹, Diana Carolina Cruz Palacios¹, Ing. Luis Miguel Méndez Moreno¹

1.Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá, Facultad de Ingeniería, Bogotá, Cundinamarca, Colombia.

γ. Autor correspondal: jupflorezsu@unal.edu.co.

Resumen

El ExPro (Fig. 1) es un exoesqueleto de 3 grados de libertad (pronación y supinación del antebrazo, flexo-extensión de la muñeca y desviación ulnar-radial de la muñeca) para rehabilitación de miembro superior, diseñado por Protos-UN, un equipo interdisciplinario de estudiantes de ingeniería mecánica, mecatrónica y electrónica, apoyados por la terapeuta Silvia Duarte, profesional del hospital universitario de la Universidad Nacional de Colombia, y el ingeniero Luis Miguel Méndez Moreno. Creado con el objetivo de brindar asistencia en tratamientos de rehabilitación a pacientes con pérdida total o parcial de la movilidad en los brazos, el ExPro es manejado mediante una interfaz gráfica que envía información a un dispositivo de control, una Raspberry Pi 3 que la interpreta y conecta con los circuitos de control y potencia, todo dispuesto en una caja de acrílico, con rejillas de ventilación, luces piloto, conexión a red de alimentación, interruptor de encendido y una parada de emergencia, anclado junto al ExPro a una mesa de altura ajustable, garantizando así orden, portabilidad, fácil manipulación y fácil desplazamiento; posteriormente los circuitos de control envían órdenes a los servomotores correspondientes a cada grado de libertad. La interfaz (Fig. 2) permite escoger el tipo de movimiento, el ángulo de apertura del mismo, el contenido de cada serie, repetición de cada movimiento dentro la serie y la cantidad de repeticiones de esta misma, para así programar una sesión de terapia según la necesidad de cada paciente; además de la interfaz gráfica, el dispositivo cuenta con una base de datos que permite almacenar y monitorear el avance de cada paciente a través de cualquier dispositivo móvil¹. En lo concerniente a la fabricación, los componentes mecánicos fueron diseñados en el software Autodesk Inventor e impresos en 3D en la Universidad Nacional en material PLA (poliácido láctico). Dada su naturaleza y finalidad para propósitos médicos el ExPro está provisto con 3 niveles de seguridad; uno digital donde la interfaz no admite ángulos de apertura mayores a umbrales establecidos en la programación, otro a nivel mecánico dada la configuración de los servomotores que tampoco admiten valores de apertura mayores a los permitidos y por último uno electrónico con una parada de seguridad que permite des-energizar todo el dispositivo en casos de extrema emergencia de manera inmediata.

Palabras clave: Exoesqueleto, rehabilitación, interfaz, servomotores, biomecánica, seguridad.

Abstract

The ExPro (Fig. 1) is an exoskeleton with 3-degrees of freedom (forearm, pronation and supination, wrist flexoextension and wrist ulnar-radial deviation) for superior member's rehabilitation, designed by Protos-UN, an interdisciplinary team of mechanical, mechatronics and

1 Video demostrativo disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=eWy-82s4F5U&t=5s>



electronic engineering students, supported by therapist Silvia Duarte, professional from University National of Colombia's hospital, and the engineer Luis Miguel Méndez Moreno. Created to give support rehabilitation treatments to patients with partial or total arms mobility loss, ExPro is managed by a graphic interface which sends information to a control device, a Raspberry Pi 3 which interprets and connects control and power circuits, everything on an acrylic box, with ventilation grids, pilot LED's, connection to a power network, ignition switch, and emergency stop next to a table where the ExPro is anchored, guarantying portability, easy manipulation and easy displacement; control circuits send information to servo-motors of each degree of freedom. The interface (Fig. 2) allows to choose the kind of movement, value of degrees, content of each series, number of iterations for each series according the movement, in order to program a therapy session according to each patient necessity; besides the graphic interface, the device has a database which allows saving and following the progress from each patient through any mobile device. About fabrication, all mechanical components were designed by Autodesk Inventor and 3D printed on the National University of Colombia in PLA (polylactic acid). Following the medical goals, the ExPro has 3 security levels, digital where the interface does not admit angles of opening greater than the threshold points established by the programming, in the mechanic level as the configuration of the servomotors was set, they do not admit that angles and also in the electrical level with an emergency stop that allows de-energize the whole device in case of extreme emergency immediately.

Keywords: Exoskeleton, rehabilitation, interface, servomotors, biomechanical, security.

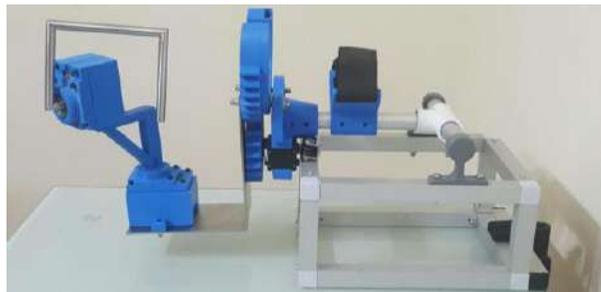


Figura 1. Primera Versión del ExPro

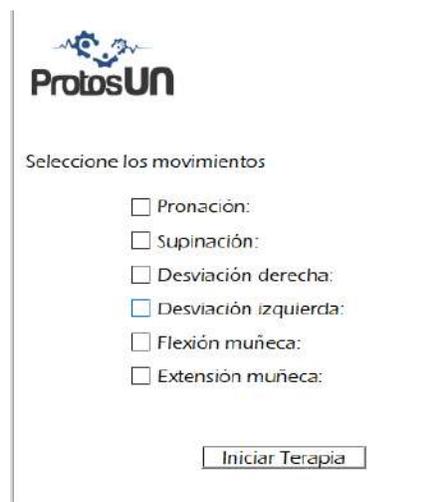


Figura 2. Interfaz gráfica que controla el ExPro



Complemento Experimental al Modelo para Medida de Dureza de Martens y Heyn

Experimental Supplement to Martens-Heyn Hardness Model

Juan Sebastián Rincón Tabares^{1,γ}, Cesar Augusto Álvarez Vargas¹

1. Grupo de investigación en Diseño mecánico y desarrollo industrial, Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, Colombia

γ. Autor corresponsal: juan.rincont@autonoma.edu.co

Resumen

Con el objetivo de verificar y complementar la ley empírica para la determinación de dureza establecida en 1908 por Martens y Heyn en [1], se planteó un diseño experimental que tomó como factores: 3 materiales metálicos, el tiempo de aplicación de carga plena, la posición radial en la sección transversal y la carga; como salida se determinó la profundidad de la huella de un indentador esférico de 1 mm de diámetro. Con ayuda de fotografías digitales sobre las huellas (tomadas con una cámara réflex SONY RX 10 II) y el software Statgraphics Centurion XVII, se demostró que la expresión de Martens y Heyn es válida en el dominio propuesto para materiales bajo ciertas condiciones y además que otras interacciones de los factores experimentales deben ser incorporadas a la formulación, como se muestra en la figura 1. En adición, para materiales como el aluminio, esta ley es imprecisa y se debe tener en cuenta la interacción entre el material y la posición radial, en la sección trasversal, sobre la cual se aplica la carga.

Palabras clave: Dureza, modelo Martens – Heyn, diseño de experimentos

Abstract

An experimental design was planned and performed in order to verify and give supplement to the empirical hardness law's developed by Martens and Heyn in 1908 [1]. The factors: 3 metallic specimens, time of application of full load, radial position on cross section and load were taken. The response variable was the depth of the indentation using a spherical indenter of 1-mm diameter. Digital photographs of indentations (using a camera SONY RX 10 II) and Statgraphics Centurion XVII were used to analyze the data. The present work shows that Martens-Heyn hardness model is only valid for specific domains and other interactions between the experimental factors must be included into the formulation as is shown in figure 1. Also, for some materials as aluminum, the law is incomplete and interaction between material and radial position on cross section, where the load is applied, must be taking account.

Keywords: Hardness, Martens-Heyn hardness model, experimental design

Referencias

- [1] A. Martens y E. Heyn, "Vorrichtung zur vereinfachten Prüfung der Kngeldruckhärte und die damit erzielten Ergebnisse.", *Z. VEREINES Dtsch. INGENIEURE*, vol. 52, 1908.

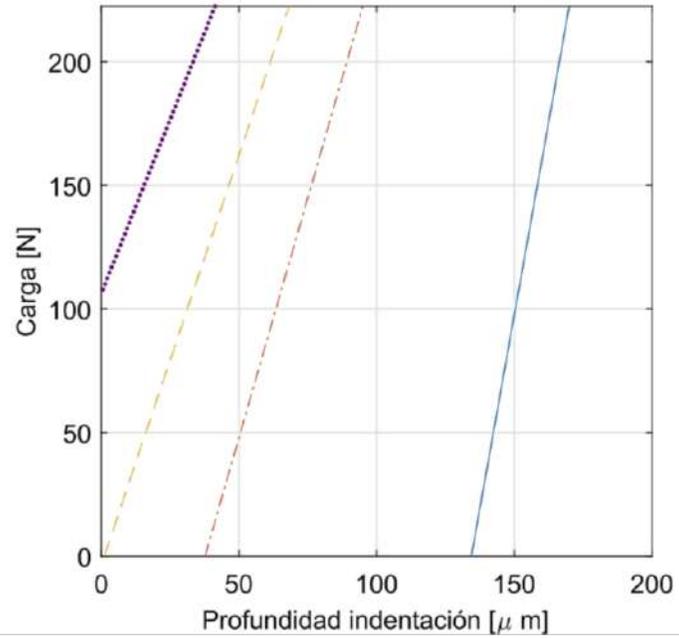


Figura 1: Prueba al modelo experimental en el dominio de [1]. [-] Aluminio; [-.-] Latón; [.-.-] Material hipotético Martens-Heyn; [.-] Acero inoxidable



Controlador CNC para Modernización del Proceso de Fresado a Bajo Costo: Caso con Fresadora Supernova

CNC Controller for Low Cost Milling Process Upgrade: Supernova Milling Machine Case

*Jennifer Rolong-Ibáñez¹, Saúl Sierra-Márquez², Edson Tapias-Higuera³, Milton Coba-Salcedo⁴,
Eugenio Yime-Rodríguez⁵, Javier Roldán-Mckinley^{6,7}*

1, 2, 3. Ingeniero Mecánico, Universidad del Atlántico, Puerto Colombia, Colombia

4. Grupo IMTEF, Ingeniería Mecánica, Universidad del Atlántico, Pto. Colombia, Colombia

5, 6. Grupo DIMER, Ingeniería Mecánica, Universidad del Atlántico, Pto. Colombia, Colombia

7. Autor correspondiente: *javierroldan@mail.uniatlantico.edu.co*

Resumen

Se presenta la implementación de un controlador CNC para una fresadora Alecop Supernova, compuesto por una tarjeta electrónica Motenc-lite PC100 (3 ejes), de 32 entradas analógicas y 16 entradas digitales (I/O) para datos. El computador ensamblado para la comunicación entre el controlador y la fresadora es de 512 Mb-RAM, 40Gb disco duro, procesador de 700 MHz, y SO Ubuntu 6.02-86bits, con tarjeta de gráficos de 800x600p, para ejecución del software libre EMC2. Se escogió la ejecución en entorno Axis para vista interactiva de los códigos G y de las coordenadas de la herramienta, y velocidades de husillo y corte. El funcionamiento del controlador se verificó con el maquinado de una pieza de media complejidad que requiere de agujero y desbastado interno. La implementación realizada mejora la funcionalidad en el modelado de piezas, al llevar la máquina de 2½ (con el antiguo controlador Fagor 8025) a 3 grados de libertad, permitiendo ahora el movimiento simultáneo en los ejes x, y, y z, dando así un mecanizado más limpio y detallado.

Palabras clave: automatización, CNC, EMC2, fresadora Supernova

Abstract

It is presented the implementation of a CNC controller for an Allecop-Supernova milling machine. The device is comprised of a 3-axis Motenc-lite card with 32 analog inputs and 16 digital inputs (I/O). A computer was assembled to communicate controller and machine, with specifications: 512Mb-RAM, 40Gb hard disc, 700 MHz processor and a graphics card 800x600p. The operative system Ubuntu 6.02-86bits allows running of the free software EMC2. It was chosen the Axis environment, able to display an interactive view of the G codes, in addition to the tool coordinates and the tool and cut speeds. The functionality of the controller was verified through the machining of a medium complexity piece that required a hole and internal rough. It was improved the functionality of the milling machine, moving from 2½ (with the original Fagor 8025 controller) to 3 degrees-of-freedom, by allowing now the simultaneous motion along the x, y and z axis, for a faster and cleaner machining process.

Keywords: automation, CNC, EMC2, Supernova milling machine

Esquema de ilustración

La figura 1 presenta un esquemático de las conexiones del hardware integrado.

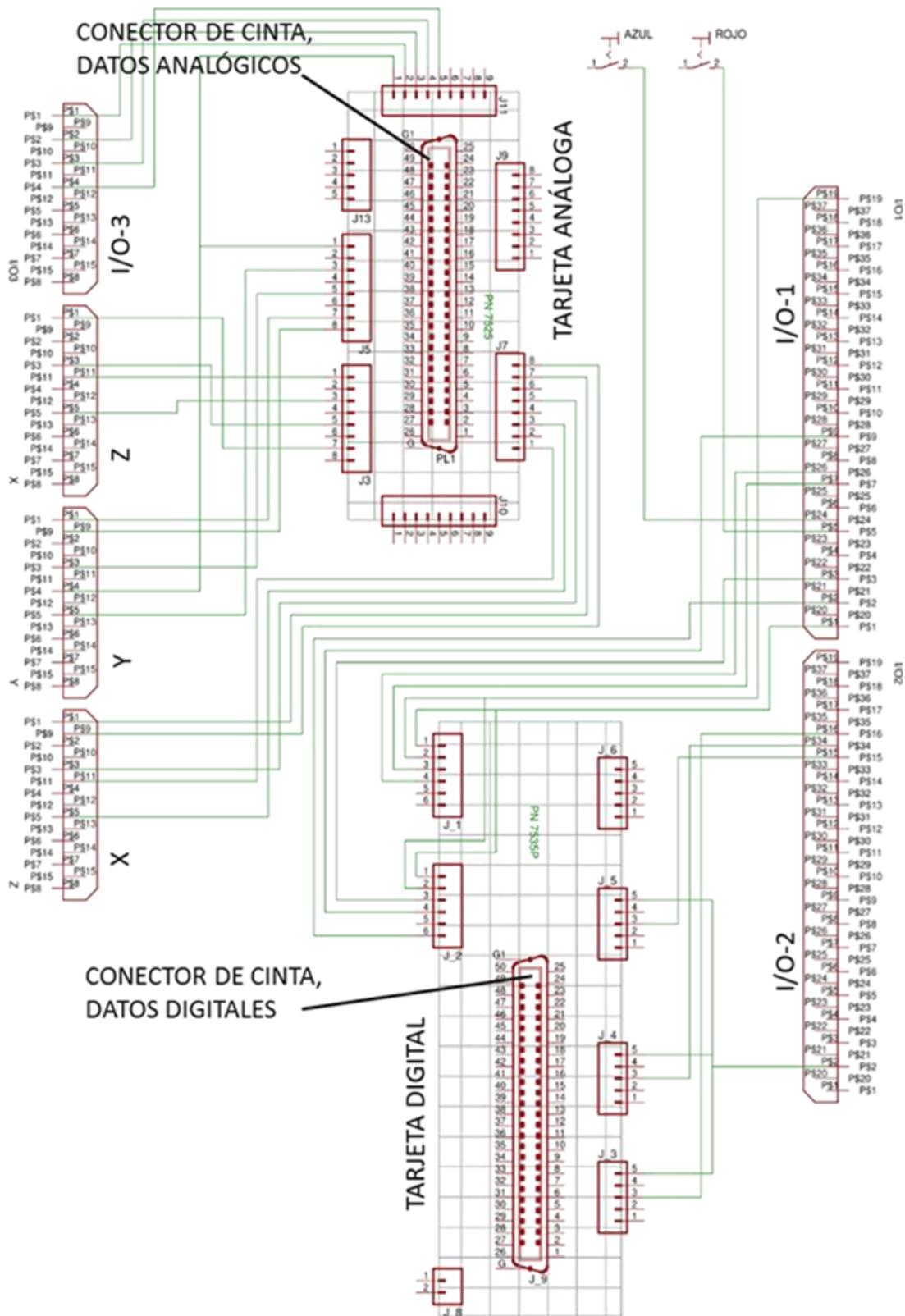


Figura 1. Esquema de conexiones del dispositivo. Fuente. Elaboración propia.



Son 6 conectores en total: 4 DB-15 tipo hembra (15 pines x 2 hileras) y dos conectores hembra tipo Sub-D (37 pines x 2 hileras). Se distinguen de este esquema las entradas de los ejes X, Y y Z. El conector I/O-3 permite la variación de la velocidad de la herramienta. Cada uno de los cuatro puertos admite también señal sinusoidal. La conexión al puerto I/O-1 indicado en la figura 1 es a través de un conector tipo SUB-D (hembra) de 37 terminales, para la conexión a la fresadora. Tiene 10 entradas digitales, 16 salidas digitales y 4 salidas analógicas de tensión de mando en rango $\pm 10V$. Para el conector I/O-2 se utiliza Conector tipo SUB-D (hembra) de 25 terminales para la conexión al armario eléctrico de 16 salidas digitales y 2 salidas analógicas de tensión de mando de los reguladores (rango $\pm 10 V$).

Referencias

- [1] M. Groover. Control Numérico y Robótica Industrial-Fundamentos de Manufactura Moderna, Materiales, Procesos y Sistemas, 3ra ed. México: Prentice Hall, 2000.
- [2] S. Kalpakjian, y S. Schmid, Manufactura, Ingeniería y Tecnología: Ingeniería y Tecnología de Materiales, 7ra ed. México: Pearson, 2015.
- [3] T. Staroveški, D. Brezak, T. Udiljak, and D. Majetić, “Implementation of a Linux-based CNC Open Control System”. 12th International Scientific Conference on Production Engineering–CIM2009, Beograd, Serbia, 2009. Available: <https://www.bib.irb.hr/421305>
- [4] H. Peña, J. Martínez, J. Ramírez, y F. Trujillo, “Torno CNC de uso didáctico: prototipo mecatrónico UCCNC01”, Revista Ingeniería Solidaria, vol. 6, no. 10, pp. 8-18, 2010. [PDF]. Disponible en: <https://revistas.ucc.edu.co/index.php/in/article/view/446/451>
- [5] B. Kovács, G. Szayer, and F. Tajti, “Design of a universal robot controller”, Revista Periódica Polytechnica, vol. 55, no. 2, pp. 95-100, 2011. [PDF]. Available: <https://pp.bme.hu/me/article/download/1258/662>
- [6] O. Chaides, S. Ávila, y H. Ahuett, “Restauración de torno de control numérico empleando software libre”, Revista Conciencia Tecnológica, vol. 42, pp. 62-67, 2011. [PDF]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/944/94421442011.pdf>
- [7] L. Pusman, and K. Kosturik, “Integration of Digimatic Measuring Tool into LinuxCNC Controlled Milling Machine by using MODBUS”. 22nd IEEE Telecommunications Forum–TELFOR 2014, Belgrade, Serbia, 2014. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7034502>
- [8] CNC Overflow, “EMC2 for CNC Machine Control”, 2002. [Online]. Available: <http://saundby.com/cnc/workflow/EMC2.shtml>
- [9] E. Slawiński, J. Postigo, V. Mut, D. Carestía, y F. Castro, “Estructura abierta de software para un robot industrial,” Revista Iberoamericana de Automática e informática Industrial, vol. 4, no. 3, pp. 86-95, Julio 2007. [PDF]. Disponible: <http://www.elsevier.es/es-revista-revista-iberoamericana-automatica-e-informatica-331-pdf-S1697791207702273>



La Rugosidad Influenciada por Factores Geométricos en Fresado de Superficies.

The Roughness Influenced by Geometric Factors in Surface Milling.

Andrés F. Cifuentes^{1, γ}, E. Córdoba Nieto¹

1. División de Ingeniería Mecánica-Universidad Nacional de Colombia

γ. Autor corresponsal: afcifuentesg@unal.edu.co

Resumen

Por medio de modelos experimentales y geométricos y en un entorno simulado se determinan valores de rugosidad propia de desviaciones de tercer orden. El entorno de simulación desarrollado a partir de la integración y verificación simulada (ISV) en software CAD/CAM NX 11. Las aproximaciones geométricas son validadas por medio del análisis de las nubes de puntos.

Se realizan 2 diseños de experimentos para determinar la influencia de los factores geométricos dinámicos definidos como: Avance transversal (A_e), ángulo Lead y ángulo Tilt, con una herramienta de fresado de punta plana. Un experimento 2^k se desarrolla con propósitos de ubicar una zona de influencia de los parámetros mencionados y validar la precisión del entorno simulado. Para el segundo experimento se presenta un modelo factorial 3^k para precisar el factor de mayor influencia sobre la rugosidad.

Como resultado de la experimentación, se obtiene un valor óptimo (mínimo) de rugosidad ubicado en zonas en donde el avance transversal es determinante y de alto impacto, el ángulo lead tiene una influencia moderada y el ángulo tilt es el factor de menor influencia. Los valores mínimos de rugosidad se presentan cuando el avance transversal es bajo, el ángulo lead es bajo y el ángulo tilt alto. El método presentado pretende ahondar en el maquinado para terminado de superficies libres con herramienta de punta plana.

Palabras clave: Modelos experimentales, ISV, CAD/CAM, DOE, Lead, Tilt, Rugosidad

Abstract

By means of experimental and geometric models and in a simulated environment, the roughness values of third order deviations are determined. The simulation environment was developed from integration and simulated verification (ISV) in the CAD / CAM software NX 11. The geometric approaches are based on the analysis of point clouds.

Two experimental designs are carried out to determine the influence of the dynamic geometric factors defined as: Transverse advance (A_e), Lead angle and Tilt angle, with a flat tip milling tool. An experiment 2^k is developed with the results of locating a zone of influence of the adjustment parameters and validating the precision of the simulated environment. For the second experiment, a factorial model 3^k is presented for the factor with the greatest influence on roughness.



As a result of the experimentation, an optimum value (minimum) of roughness is obtained located in areas where the transversal advance is determinant and of high impact, the main angle has a moderate influence and the angle is the factor of least influence. The values Roughness minima occur when the transverse advance is low, the angle is low and the angle of inclination is high. The method presented has the purpose of obtaining a surface free space with the flat-tipped tool.

Keywords: Experimental models, ISV, CAD/CAM, DOE, Lead, Tilt, Roughness.

Referencias

- [1] K. D. Bouzakis, P. Aichouh, and K. Efstathiou, "Determination of the chip geometry, cutting force and roughness in free form surfaces finishing milling, with ball end tools," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 43, no. 5, pp. 499–514, 2003.
- [2] P. G. Benardos and G. C. Vosniakos, "Predicting surface roughness in machining: A review," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 43, no. 8, pp. 833–844, 2003.
- [3] X. Chen, J. Zhao, Y. Dong, S. Han, A. Li, and D. Wang, "Effects of inclination angles on geometrical features of machined surface in five-axis milling," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 65, no. 9–12, pp. 1721–1733, 2013.
- [4] S. M. Wu, "STATISTICAL EVALUATION AND ITS RELATIONSHIP TO OF SURFACE FINISH PARAMETERS STUDIES illustrating the influence of common cutting parameters on the workpiece surface roughness for single point turning have been performed by a number of investigators I-1-," vol. 1, 1977.
- [5] P. . Benardos and G. . Vosniakos, "Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi's design of experiments," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 18, no. 5, pp. 343–354, 2002.
- [6] J. A. García Barbosa, J. M. Arroyo Osorio, and E. Córdoba Nieto, "Simulation and verification of parametric numerical control programs using a virtual machine tool," *Prod. Eng.*, vol. 8, no. 3, pp. 407–413, 2014.
- [7] Y. Sahin and A. R. Motorcu, "Surface roughness model for machining mild steel with coated carbide tool," *Materials and Design*, vol. 26, no. 4, pp. 321–326, 2005.
- [8] S. K. Gupta, T. R. Kramer, D. S. Nau, W. C. Regli, and G. Zhang, "Building MRSEV models for CAM applications," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 20, no. 2–3, pp. 121–139, 1994.
- [9] B. S. Reddy, J. S. Kumar, and K. V. K. Reddy, "Optimization of surface roughness in CNC end milling using response surface methodology and genetic algorithm," *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 8, pp. 102–109, 2011.
- [10] J. Qu and A. J. Shih, "Analytical surface roughness parameters of a theoretical profile consisting of elliptical arcs," *Mach. Sci. Technol.*, vol. 7, no. 2, pp. 281–294, 2003.



Evaluación de Diferentes Tratamientos Superficiales en el Comportamiento a Fatiga de un Acero CA6NM.

Evaluation of Different Surface Treatments on the Fatigue Behavior of a CA6NM Steel.

Erick Hernández Rengifo^{1, γ}, Sara Aida Rodríguez Pulecio¹, John Jairo Coronado Marín¹.

1. Escuela de ingeniería Mecánica, Grupo de investigación de fatiga y superficies (GIFS),
Universidad del Valle, Cali, Colombia

γ. Autor corresponsal: erick.hernandez@correounivalle.edu.co

Resumen

La mayoría de los trabajos actuales sobre el acero CA6NM se centran en el desgaste por abrasión, erosión y cavitación. Sin embargo, los estudios sobre el comportamiento a la fatiga en este acero rara vez se abordan en la literatura. El objetivo principal de esta investigación es dilucidar el efecto de los tratamientos superficiales en el comportamiento a la fatiga rotativa del acero CA6NM. Nitruración por plasma, carbonitruración por sales y recubrimiento por HVOF fueron aplicados en muestras de CA6NM. Se realizaron ensayos de fatiga de alto ciclaje en flexión rotativa en agua para representar el entorno ambiental de trabajo (Turbinas). Microscopía electrónica de barrido (SEM), difracción de rayos X y nanoindentación se utilizaron para caracterizar los mecanismos de fractura, los esfuerzos residuales, la identificación de fases y los perfiles de dureza, respectivamente. Los resultados de la resistencia a la fatiga de cada condición se explicaron y correlacionaron con la dureza, microestructura y esfuerzos residuales. Para ambos tratamientos, hubo un aumento sustancial en la dureza de la superficie, así como en la vida de fatiga con respecto al material no tratado. Estos resultados están asociados a la capa compuesta y a la capa de difusión que están relacionados con la formación de nitruros de hierro gamma y epsilon (γ -Fe₄N y ϵ -Fe₂-3N) y nitruros de cromo (Cr₂N), para el recubrimiento de WC₁₀Co₄Cr por HVOF se incrementó levemente el límite de fatiga en comparación con el material base. Esto es asociado con una elevada adherencia del recubrimiento y que el material base no fue afectado por la temperatura de aplicación. El aumento en la dureza superficial para la nitruración por plasma fue del 212%, la carbonitruración por sales del 305% y el recubrimiento por HVOF fue de 326%. el límite de fatiga aumentó en un 46% en nitruración por plasma, 51% para la carbonitruración por sales y 3% para el recubrimiento por HVOF en 2 millones de ciclos. Esto permitió producir nuevo conocimiento acerca del comportamiento mecánico a la fatiga de estos materiales, que son ampliamente utilizados a nivel industrial en diversas aplicaciones.

Palabras clave: Nitruración por plasma, carbonitruración por sales, HVOF, fatiga por flexión, acero CA6NM.

Abstract

Most of the current works on CA6NM steels are focused on abrasion, erosion and cavitation wear. However, studies on the fatigue behavior of this steel are seldom been addressed in the literature. The main goal of this research is to elucidate the effect of superficial treatments on the rotating fatigue behavior of a CA6NM Steel. Plasma nitriding, carbonitriding by salts and coating by HVOF were applied on CA6NM samples. High cycling fatigue tests in rotatory bending were performed in water to represent the generally work environmental (turbines). Scanning electron microscopy



(SEM), X-ray diffraction, and Nano indentation were used to characterize the fracture mechanisms, residual stresses and phases identification, and hardness profiles, respectively. The results of fatigue resistance of each condition were explained and correlated with the hardness, microstructure and residual stresses. For both treatments, there was a substantial increase in surface hardness, as well as in fatigue life with respect to the untreated material. These results are associated to the compound layer and diffusion layer which are related to the formation of iron nitrides gamma and epsilon ($\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$ y $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$) and chromium nitrides (Cr_2N), for the coating of WC10Co4Cr by HVOF slightly increase the fatigue limit in comparison with the base metal. This is associated with a high adherence of the coating and the base material was not affected by application temperature. The increase in surface hardness for the plasma nitriding was 212%, carbonitriding by salts 305% and HVOF was 326%. the fatigue limit increased by 46% in plasma nitriding, 51% for carbonitriding by salts and 3% for coating by HVOF at 2 million cycles. This allowed to produce new knowledge about the mechanical fatigue performance of these materials, which are widely used at industrial level in various applications.

Keywords: Plasma nitriding, Carbonitriding by salts, HVOF, Bending fatigue, CA6NM Steel.



Influencia del Contenido de ZnO en la Cristalización y Microestructura de Vitrocerámicas Obtenidas a Partir de Residuos Sólidos

Influence of the ZnO Content in the Crystallization and Microstructure of Glass-Ceramics Obtained from Solid Waste

Estefania Montoya Quesada^{1, γ}, Mónica A. Villaquirán Caicedo¹, Ruby M. de Gutiérrez¹

1. Grupo Materiales Compuestos, Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle, Cali, Colombia

γ. Autor corresponsal: estefania.montoya.quesada@correounivalle.edu.co

Resumen

Las vitrocerámicas son materiales policristalinos formados por la cristalización controlada del vidrio, que presenta características sobresalientes en comparación con las cerámicas y vidrios tradicionales. La mayor ventaja del proceso vitrocerámico es que, debido al propio proceso de vitrificación de partida que implica su obtención, permite incorporar en su composición numerosos residuos mineros e industriales que contienen porcentajes relevantes de sílice y otros óxidos similares a las de las materias primas convencionales. Sin embargo, en ocasiones es necesaria la incorporación de otros óxidos para mejorar la nucleación y fluidez del vidrio parental.

Un grupo importante de desechos industriales es el de residuos de silicatos, que pueden, de esta manera, no sólo ser inertizados, sino, además, convertirse, sin riesgo para el medio ambiente, en materias primas útiles para fabricar nuevos productos. Por lo tanto, se seleccionó ceniza volante (CV), casco de vidrio de ventana (VV) y escoria siderúrgica de alto horno (ES), para obtener materiales vitrocerámicos del sistema CaO-Al₂O₃-SiO₂. Se diseñó una mezcla de 0.5CV-0.4ES-0.1VV con una relación CaO/SiO₂ de 0.36 para evaluar el efecto del ZnO en proporciones de 0, 4, 7 y 10% sobre la fluidez, cristalización y durabilidad. Para la obtención de estos materiales, los polvos fueron mezclados y fundidos en un crisol de alúmina a 1450 °C durante 2 h. La masa fundida se enfrió en agua para obtener la frita de vidrio y por último, las vitrocerámicas se obtuvieron mediante tratamiento térmico de la frita obtenida para cada uno de los casos. El comportamiento de cristalización se estudió mediante calorimetría de barrido diferencial (DSC), espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR), difracción de rayos X (XRD) y microscopia electrónica de barrido (MEB). Se encontró que al cambiar el contenido de ZnO la temperatura de cristalización se modifica y por tal motivo se ven influenciadas las propiedades finales de la vitrocerámica, como su durabilidad en ambientes de ácidos y bases. Con los resultados de este estudio se ha encontrado que el reciclaje de diferentes desechos industriales colombianos representa tres ventajas principales: en primer lugar, el uso de un material de costo cero, en segundo lugar, la conservación de los recursos naturales y en tercer lugar, la eliminación de diferentes residuos.

Palabras clave: vitrocerámica, desechos sólidos, ZnO, cristalización, vidrios.



Abstract

Glass-ceramics are polycrystalline materials formed by the controlled crystallization of glass, which has outstanding characteristics in comparison with traditional ceramics and glass. The greatest advantage of the glass ceramic process is that, due to the initial vitrification process involved in obtaining it, it allows incorporating in its composition numerous mining and industrial residues that contain relevant percentages of silica and other oxides similar to those of conventional raw materials. However, it is sometimes necessary to incorporate other oxides to improve the nucleation and fluidity of the parental glass.

An important group of industrial waste is silicate waste, which can, in this way, not only be inert, but also become, without risk to the environment, useful raw materials to manufacture new products. Therefore, fly ash (CV), window glass hull (VV) and blast furnace slag (ES) were selected to obtain glass-ceramic materials from the CaO-Al₂O₃-SiO₂ system. A mixture of 0.5CV-0.4ES-0.1VV with a CaO/SiO₂ ratio of 0.36 was designed to evaluate the effect of ZnO in proportions of 0, 4, 7 and 10% on the fluidity, crystallization and durability. To obtain these materials, the powders were mixed and melted in an alumina crucible at 1450 °C for 2 h. The melt was cooled in water to obtain the glass frit and finally, the glass-ceramics were obtained by heat treatment of the frit obtained for each of the cases. The crystallization behavior was studied by differential scanning calorimetry (DSC), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). It was found that by changing the ZnO content the crystallization temperature is modified and for this reason the final properties of the glass ceramic are influenced, such as its durability in acid and base environments. With the results of this study it has been found that the recycling of different Colombian industrial waste represents three main advantages: first, the use of a zero cost material, secondly, the conservation of natural resources and third, the elimination of different waste.

Keywords: Glass-ceramic, solid waste, ZnO, crystallization, glasses.



Development of a Computer Application for Extraocular Muscle Analysis Based on a Parallel Kinematics Model of the Eye

Carlos A. Trujillo Suárez^{1, γ}, Andrés F. Jaramillo Osorio¹

1. Department of Mechanical Engineering, University of Antioquia, Medellín, Colombia.

γ. Autor correspondal: carlos.trujillo@udea.edu.co

Resumen

Se propone un modelo mecánico para los movimientos oculares basado en un mecanismo de cinemática paralela, donde los músculos extraoculares pueden ser reemplazados por cables. Basados en este enfoque se presentan las condiciones anatómicas para el movimiento del ojo y se analiza la cinemática inversa para obtener curvas de isodeformación de los músculos extraoculares. Se desarrolló una aplicación computacional que simula el movimiento del ojo y muestra las curvas de deformación asociadas en tiempo real. Los resultados son una contribución novedosa al modelado de sistemas biomecánicos utilizando teoría cinemática; la aplicación computacional es un recurso útil para entrenamiento médico y clínico.

Palabras clave: Movimiento ocular, músculos extraoculares, cinemática inversa, curvas de isodeformación, mecanismos de cinemática paralela.

Abstract

We propose a mechanical model of eyeball movements based on parallel kinematics mechanism, where the extraocular muscles can be replaced by cables. Based on this framework, we present the anatomical conditions for the eyeball movement, analyze its inverse kinematics to obtain isodeformation curves of extraocular muscles. A computer application was developed that simulates eyeball movement and displays the associated deformation curves in real time. The results are a novel contribution to the modeling of biomechanical systems using kinematics theory; the computer application is a useful resource for medical and clinical training.

Keywords: Eyeball movement, extraocular muscles, inverse kinematics, isodeformation curves, parallel kinematics mechanisms.

References

- [1] Tweed D, Vilis T. Geometric relations of eye position and velocity vectors during saccades. *Vision research* 1990; 30(1):111–27.
- [2] Wright KW. Anatomy and physiology of eye movements. In: *Pediatric Ophthalmology and Strabismus*. Springer; 2003, p. 125–43.
- [3] Haslwanter T. Mathematics of three-dimensional eye rotations. *Vision research* 1995; 35(12):1727–39.
- [4] Bayro-Corrochano E. Modeling the 3d kinematics of the eye in the geometric algebra framework. *Pattern recognition* 2003; 36(12):2993–3012.
- [5] Cannata G, Maggiali M. Models for the design of bioinspired robot eyes. *IEEE Transactions on Robotics* 2008; 24(1):27–44.



- [6] Wang XY, Zhang Y, Fu XJ, Xiang GS. Design and kinematic analysis of a novel humanoid robot eye using pneumatic artificial muscles. *Journal of Bionic Engineering* 2008; 5(3):264–70.
- [7] Boeder P. Co-operative action of extraocular muscles. *The British journal of ophthalmology* 1962;46(7):397–403.
- [8] Miller J, Pavlovski D, Shaemeva I. *Orbit 1.8 Gaze Mechanics Simulation - User's Manual*. San Francisco: Eidactics; 1999. URL: <http://www.eidactics.com/projects/ooi>; (retrieved Oct. 1, 2018).
- [9] Merlet JP. *Parallel Robots*. 2nd ed.; The Netherlands: Springer; 2006.
- [10] Trujillo, C. A. Inverse kinematics of the eye. *Memorias 1er. Congreso Internacional de Tecnologías Avanzadas de Mecatrónica, Diseño y Manufactura - AMDM 2012*. Paper TCA-ROB112. CD.
- [11] Krewson 3rd WE. The action of the extraocular muscles: a method of vector-analysis with computations. *Transactions of the American Ophthalmological Society* 1950; 48:443–86.
- [12] Bottema O, Roth B. *Theoretical kinematics*. NORTH-HOLLAND PUBL CO, NY; 1979.
- [13] McCarthy JM. *Introduction to theoretical kinematics*. MIT press; 1990.



Desarrollo de un Banco de Instrumentación para la Captura de Señales Provenientes de un Motor de Combustión Interna Diésel

Development of an Instrumentation Bank for the Capture of Signals Coming from a Diesel Internal Combustion Engine

Juan David Ramírez¹, Juan Camilo Mejía Hernández¹ γ, Héctor Fabio Quintero¹, Edison de Jesús Henao Castañeda¹, Carlos Alberto Romero Piedrahita¹ y Wilson Pérez Castro¹

1. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia

γ, Autor corresponsal: j.mejia1@upt.edu.co

Resumen

Desde la invención, el Motor de Combustión Interna (MCI) se utiliza en una amplia gama de aplicaciones automovilísticas, aeronáuticas, ferroviarias entre otras. Debido a lo anterior, se han desarrollado diversas técnicas de monitoreo, diagnóstico y mantenimiento para los MCI, las cuales tienen como objetivo mantenerlos en buen estado para reducir costos de reparación, garantizar la disponibilidad y eficiencia. Generalmente, las técnicas de mantenimiento de los MCI se basan en el análisis de señales intrínsecas provenientes de los mismos (temperatura, vibraciones, gases, etc.) y la captura de estas conlleva un enorme trabajo de instrumentación. En este artículo, se presenta detalladamente un robusto y eficiente banco de instrumentación para la captura de señales proveniente de un motor de combustión interna. Las señales capturadas del MCI son temperatura (bloque, aceite, escape y admisión), vibraciones en todos los ejes, presión (cámara de combustión y aire de admisión), posición angular, velocidad, golpeteo y carga. Cada señal fue analizada y acondicionada para ser capturada por el sistema de adquisición de la National Instruments (NI), con el objetivo de cumplir con estándares de comparación establecidos en el estado del arte. Cabe resaltar que, gracias a la metodología implementada todas las señales se capturan de manera simultánea, lo cual permite realizar correlaciones entre las mismas en el tiempo y así encontrar información relevante. Fruto de este trabajo, se presenta un conjunto de señales provenientes de MCI que generalmente no son tomadas en cuenta para realizar diagnósticos y muchos menos analizadas de manera conjunta. Además, se exhibe una base de datos con todas las señales cambiando las condiciones de trabajo (velocidad y carga) del MCI, la cual puede ser utilizada para casos de estudio.

Palabras clave: Motor de Combustión Interna, Técnicas de monitoreo, Instrumentación, National Instruments, Condiciones de trabajo.

Abstract

Since the invention, the Internal Combustion Engine (ICM) has been used in a wide range of automotive, aeronautical and railway applications, among others. Due to the above, several monitoring, diagnosis and maintenance techniques have been developed for the MCI, which aim to keep them in good condition to reduce repair costs, guarantee availability and efficiency. Generally, the MCI maintenance techniques are based on the analysis of intrinsic signals coming from them (temperature, vibrations, gases, etc.) and the capture of these involves an enormous work of instrumentation. In this article, a robust and efficient instrumentation bank for the capture



of signals coming from an internal combustion engine is presented in detail. The signals captured from the MCI are temperature (block, oil, exhaust and intake), vibrations on all axes, pressure (combustion chamber and intake air), angular position, speed, tapping and load. Each signal was analyzed and conditioned to be captured by the acquisition system of the National Instruments (NI), in order to comply with standards of comparison established in the state of the art. It should be noted that, thanks to the implemented methodology, all the signals are captured simultaneously, which allows to make correlations between them over time and thus find relevant information. As a result of this work, we present a set of signals from MCI that are not generally taken into account to make diagnoses and much less analyzed jointly. In addition, a database with all the signals is displayed, changing the working conditions (speed and load) of the MCI, which can be used for case studies.

Keywords: Internal combustion engine, monitoring techniques, instrumentation, National Instruments, working conditions.



Análisis Dinámico Comparativo del Efecto de la Técnica Movimiento del Snatch Sobre la Articulación de la Rodilla

Comparative Dynamic Analysis of the Effect of a Well-Performed Technique of the Snatch on the Knee Joint

Ing. Diana Yaquelin Barrero Malagón^{1,γ}, MSc. Laura Juliana Suárez Collazos¹

1. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
γ. Autor corresponsal: dy.barrero10@uniandes.edu.co

Resumen

El *Snatch* es un ejercicio recurrente en las nuevas tendencias deportivas implementadas en los últimos años en el que se ha evidenciado un alto potencial de lesión en el sistema musculoesquelético del deportista, particularmente en los miembros inferiores, como consecuencia de la mala ejecución de la técnica del movimiento. El propósito de este estudio es realizar un análisis comparativo sobre el movimiento del *Snatch* en practicantes de CrossFit del mismo género con diferentes niveles deportivos (principiante y avanzado) partiendo de parámetros de posición y fuerza para determinar las cargas dinámicas que soporta la articulación de la rodilla durante la ejecución de un ciclo completo. Se estudió la dinámica del *Snatch* de dos mujeres, una profesional y una principiante, teniendo en cuenta el movimiento con barra y sin barra. Los resultados fueron obtenidos a partir de un análisis realizado con el método de captura de movimiento en 3D (“Motion Capture”) implementando el protocolo “Helen Hayes”. Se utilizaron cuatro cámaras “OptiTrack Prime 13” a 100 Hz con marcadores pasivos y plantillas de fuerza “Moticon” (*Sensing Foot Dynamics*) operando a 50 Hz. La información encontrada indica que existen diferencias en la técnica del movimiento entre las mujeres generando un incremento en las reacciones de fuerza sobre la articulación de la rodilla de la principiante de 6,11% respecto a la profesional. La potencia generada en un ciclo de movimiento por la principiante es superior 171,81% respecto a la profesional debido a las velocidades utilizadas durante la etapa de atrape, cuando se realiza el movimiento sin barra, y 5,08% superior respecto a la principiante durante el segundo halón cuando se utiliza la barra.

Palabras clave: Biomecánica, Articulación de la Rodilla, Snatch, Captura de Movimiento

Abstract

The *Snatch* is part of the sport of weightlifting currently used in recreational strength training workouts and it has shown a high potential of musculoskeletal injury risk of lower limbs due to poor executions of the exercise. The main purpose of this study is to present a comparative dynamic analysis of motion on same gender but different sport level (beginner and professional) crossfitters based on position and force data obtained from a capture motion analysis using the “Helen Hayes” protocol. The dynamic reactions on the knee joint of two women performing the Snatch with and without a weighted bar are presented for the three phases of a well-performed technique. Subjects were instrumented with “Moticon” force sensors (*Sensing Foot Dynamics*) operating at 50 Hz; four cameras “OptiTrack Prime 13” at 100 Hz with passive markers were used to provide the input parameters of the dynamic analysis. Information found indicates that there is a difference on the



reaction forces supported by the knee joint of the beginner of 6.11% higher in contrast to the professional crossfitter. However, power generation along the complete motion of the Snatch is 171.81% higher for the beginner during the catching phase when using a not weighted bar and 5.08% higher for the professional women during the second pull when using the bar.

Keywords: Biomechanics, Knee Joint, Snatch, Motion Capture

Referencias

- [1] STS Systems, «Helen Hayes: Colocación de Marcadores,» 2014.
- [2] C. L. Vaughan , B. L. Davis y J. C. O' Connor, Dynamics of Human Gait, Cape Town, South Africa: Kiboho Publishers, 1992.
- [3] V. Gourgoulis, N. Aggeloussis, P. Antoniou, C. Christoforidis, G. Mavromatis y A. Garas, «Comparative 3-Dimensional Kinematic Analysis of the Snatch Technique in Elite Male and Female Greek Weightlifters,» Department of Physical Education and Sport Science, Greece, 2002.
- [4] G. Calhoun y A. Fry, «Injury Rates and Profiles of Elite Competitive Weighlifters,» University of Memphis, Mephis, 1999.
- [5] R. Escamilla, «Knee biomechanics of the dynamic squat exercise,» Medicine and Science in Sport and Exercise, Durham, 2001.
- [6] G. Waryasz y A. Y. McDermott, «Patellofemoral pain syndrome (PFPS): a systematic review of anatonmy and potential risk factors,» *Dynamic Medicine*, 2008.
- [7] M. Teodoru y D. Muraretu, «Concentration Time in 53 kg Women's Weightlifting Clean & Jerk,» National University of Physical Education and Sport , 2013.
- [8] P. Beltrán y A. Colina, «Biomechanical analysis of weightlifting during the second pull snatch done for an athlete Vargas state in the national Youth Sports Games 2013,» Instituto Nacional de Deporte Venezuela , 2013.
- [9] Moticon, «Moticon,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.moticon.de/>.



Diseño de una Máquina de Rotomoldeo Basada en el Principio de Giróscopo **Rotomolding Machine Design Based on Gyroscope Principle**

Iván Cano-Ruiz¹, Joaquín De La Cruz-Salcart², Alfonso Rodríguez-Peña³, Eugenio Yime-Rodríguez⁴, Javier Roldán-Mckinley⁵ y

1, 2. Ingeniero Mecánico, Universidad del Atlántico, Puerto Colombia, Colombia

3. Grupo CONFORMAT, Ingeniería Mecánica, Universidad del Atlántico, Pto. Colombia, Colombia

4, 5. Grupo DIMER, Ingeniería Mecánica, Universidad del Atlántico, Pto. Colombia, Colombia

γ. Autor correspondiente: javierroldan@mail.uiatlamntico.edu.co

Resumen

Se reporta el diseño de una máquina tipo giróscopo de dos ejes usada en el proceso de rotomoldeo para fabricar piezas ornamentales de mármol sintético. Como característica de diseño, se considera el movimiento independiente para cada eje de rotación suministrado por motores independientes. Las velocidades de rotación sugeridas para cada uno de los ejes fueron tomadas a partir de experimentos documentados en publicaciones previas. Las ecuaciones dinámicas se usaron para establecer las expresiones del torque en cada eje de acuerdo con la masa y forma (inercia) de los elementos rotatorios. Un diseño conceptual y detallado, combinado con las ecuaciones dinámicas que rigen el movimiento permitieron establecer el algoritmo y respectiva programación en Matlab. Este programa calcula factores de seguridad de componentes disponibles en el mercado local y arroja el dimensionamiento inicial que es usado en la herramienta paramétrica DriveWorkXpress de SolidWorks para crear un modelo CAD, usado para simulaciones de elemento finito y para generar planos de fabricación. El procedimiento se ilustró para el caso de un ornamento de tamaño 0.9x0.9x0.6m.

Palabras clave: rotomoldeo, giroscopio, diseño de maquinaria, mármol sintético

Abstract

It is presented the design of a gyroscope-based machine for imitation marble rotomolding. The main feature of the proposed model is the capability of independent rotational motion for each axis. The rotational speeds were set from documented experimental reports. Dynamic equations were used to establish the torque expressions according to the mass and shape (inertia) on the rotatory elements. A Matlab program was created to evaluate the safety factors of the main components that are commercially available in the local market. Parametric design capability of DriveWorkXpress was used to create a CAD model in SolidWorks to perform finite element analysis to verify results and generate the machine blueprints. The proposed methodology was illustrated with an ornamental imitation marble piece of 0.9x0.9x0.6m dimensions.

Keywords: rotomolding, gyroscope, machine design, imitation marble

Ilustración del trabajo

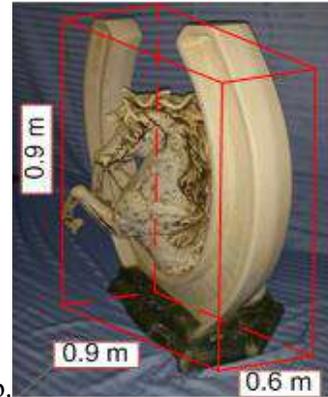
La figura 1.a presenta el esquema de una máquina de rotomoldeo con capacidad independiente de giro para cada eje, lograda mediante el uso de anillos colectores eléctricos. Para ejemplificar la metodología propuesta, se analizó un molde similar al utilizado para la fabricación por rotomoldeo



de la pieza mostrada en la figura 1.b, aproximándose a un paralelepípedo de dimensiones mostradas en la figura 1.b



a.



b.

Figura 1. a. Modelo diseño de la máquina para el caso ilustrado. b. Base de comedor fabricada en rotomoldeo con mármol cultivado. Fuente: elaboración propia

Referencias

- [1] P. Dodge, D. Mahan, and S. Andrzejewski. Rotational Molding, 1st. ed. USA: Wiley, 2006.
- [2] Rotomoldeo II, Tecnología de los Plásticos, dic. 2011. Disponible en: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/12/rotomoldeo-ii.html>
- [3] J. Rakes, R. Ree and E. Held. Method of Rotational Molding. U.S. Patent 3474165. Philips Petroleum Company, 1966.
- [4] N. Henwood y C. García. Cómo mantener la calidad de los productos en proceso de manufactura por rotomoldeo, Tecnología del Plástico, abr. 2008. Disponible en: <http://www.plastico.com/temas/Como-mantener-la-calidad-de-los-productos-en-proceso-de-manufactura-por-rotomoldeo+3062210?pagina=1>
- [5] G. Beall. Rotational Molding: Design, Materials, Tooling, and Processing, 1st. ed. USA: Hanser-Gardner Publications, 1998.
- [6] Y. Satoh, H. Tsuchihashi and S. Tani. Rotational Molding Apparatus Having Robot to Open, Close, Charge and Clean Molds. U.S. Patent 4629409. Takara Co. 1986.
- [7] Y. Wang, K. Zhang, Y. Dai, J. Liu and Y. Zhang. "State-of-the-art of rotational molding technique and its application", Applied Mechanics and Materials, vols. 80-81, pp. 980-984, 2011.
- [8] L. Payne. Multiaxis Rotational Molding Process. U.S. Patent 5316701, 1994.
- [9] L. Payne and N. LaMolt. Multiaxis Rotational Molding Apparatus. U.S. Patent 188845, 1993.
- [10] T. Jachowicz, and J. Sikora. "Investigation of the influence of mold rotational speed on the cast wall thickness in the rotational molding process", *Advances in Science and Technology Research Journal*, vol. 7, no. 19, pp. 79–87, 2013.
- [11] R. Hibeler. Engineering Mechanics: Dynamics, 14th. ed. New York: Pearson, 2015.
- [12] R. Budynas, and K. Nisbett. Shigley's Mechanical Engineering Design, 10th. ed. USA: McGraw-Hill Education, 2014.
- [13] AWS Classification Explained, jun. 2016. Available: <https://www.lincolnelectric.com/en-gb/support/process-and-theory/Pages/aws-classifications-detail.aspx> 1
- [14] SKF online bearing calculator, feb. 2017. Available: <http://www.skf.com/ve/knowledge-centre/engineering-tools/skfbearingcalculator.html>



- [15] SKF acoples para ejes flexibles, abr. 2015. Disponible en: <http://www.skf.com/ve/products/coupling-systems/flexible-shaft-couplings/index.html>
- [16] Catálogo Steckerl hierros y aceros., dic. 2010. Disponible en: <http://steckerlacieros.com/catalogo/index.html>
- [17] Moog Components Group, Slip rings with through bores, feb. 2015. Available: <http://www.moog.com/products/slip-rings/commercial-industrial-slip-rings/slip-rings-with-through-bores/ac4598/>
- [18] Lincon Electric, Welding and Cutting Solutions: 2018 Equipment Catalog. USA, 2018. Available: <https://www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/e110.pdf>



Potenciación de la Plataforma DCP-UAO para la Impresión de Materiales Cerámicos y Poliméricos

Upgrading of the DCP-UAO Platform for Printing Ceramic and Polymeric Materials

Francisco José Mercado Rivera^{1, γ}, Diana Victoria Ramírez López¹, Álvaro José Rojas¹ Arciniegas.

1. Departamento de Automática y Electrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia

γ. Autor corresponsal: francisco.mercado@uao.edu.co

Resumen

En el laboratorio de fabricación digital (FabLab Cali) de la Universidad Autónoma de Occidente se ha desarrollado una impresora 3D en configuración delta (DCP-UAO), la cual se muestra en la Figura 1 y que actualmente es capaz de realizar movimientos en los ejes X, Y y Z mediante una tarjeta Ramps 1.4, encargada del control de tres motores NEMA 17 y de la cinemática del sistema de impresión [1]. La impresora fue diseñada para permitir la fabricación de piezas mediante deposición de materiales cerámicos, para lo cual cuenta con un sistema de extrusión neumático que permite trabajar con materiales como yeso o arcilla. Sin embargo, este sistema presenta algunas limitaciones como: la adhesión de material al interior del extrusor, el requerimiento de un sistema de aire comprimido en el lugar de trabajo de la máquina y el volumen de material que puede ser extruido sin interrumpir la impresión.

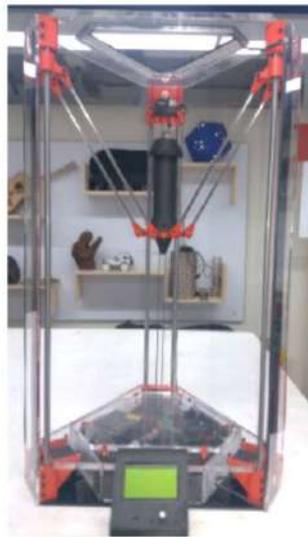


Figura 1. Impresora DCP-UAO

Teniendo en cuenta dichas limitaciones se planteó la siguiente pregunta: ¿cómo desarrollar un sistema de impresión 3D, partiendo de la estructura delta existente en la Universidad Autónoma de Occidente, que permita la extrusión y deposición de distintos materiales cerámicos y que igualmente pueda utilizarse para la fabricación con filamentos poliméricos?



Como primera etapa se implementó un extrusor de filamento en la impresora DCP-UAO (Figura 2), el cual permite la impresión con materiales como el ABS, PLA y TPU mediante la técnica de FDM [2]. Adicionalmente, para hacer la integración de este nuevo extrusor al sistema se generó un nuevo firmware que permitiera el uso de los dos extrusores (extrusor de filamento y extrusor de cerámicos existente), aunque no simultáneamente debido a que la máquina está diseñada para trabajar únicamente con un sistema de extrusión al tiempo.

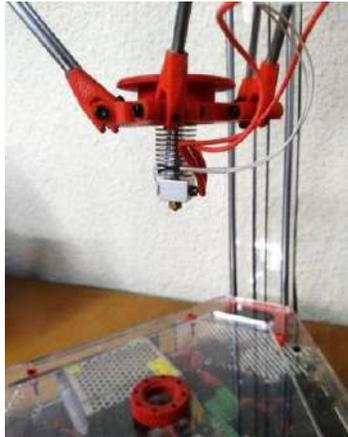


Figura 2. Cabezal de extrusión por FDM.

Como siguiente paso se plantea el diseño y construcción de un nuevo cabezal que permita la deposición de diversos materiales cerámicos, generando la mínima cantidad de desperdicios. El diseño de este cabezal debe permitir el cambio de boquilla con diversos diámetros de forma sencilla, ya que esto facilitaría la extrusión de distintos materiales dependiendo su viscosidad. Además, tras haber observado las limitaciones ligadas al sistema neumático, se propone evaluar otras alternativas, como un sistema electromecánico.

Palabras clave: cerámicas, robot delta, impresión 3D.

Abstract

At the digital fabrication laboratory (FabLab Cali) from Universidad Autónoma de Occidente, a 3D printer with delta configuration (DCP-UAO) was developed, which is shown in Figure 1 and is capable of performing movement in the X, Y and Z axis through a Ramps 1.4 board in charge of controlling three NEMA 17 motors along with the system's cinematic [1]. The printer was developed to allow the fabrication of parts through deposition of ceramic materials, like plaster or clay. However, the system has some limitations: the adhesion of material to the inner walls of the extruder, the requirement of a compressed air system at the working place and the volume of material that can be extruded without interrupting the printing process.



Figure 1. DCP-UAO Printer

Considering the limitations mentioned above, the following question was posed: how to develop a 3D printing system, starting from the structure that currently exists at Universidad Autónoma de Occidente, which allows the extrusion and deposition of different ceramic materials and which could also be used to the fabrication with polymeric filaments?

As a first stage, a filament extruder was implemented on the DCP-UAO 3D printer (Figure 2), which allows the use of materials such as ABS, PLA and TPU through FDM [2]. Additionally, in order to integrate this new extruder to the system, a new firmware was generated, which allows the use of two extruders (filament extruder and existing ceramics extruder), but not simultaneously as the machine is designed to work with only one extrusion system at a time.

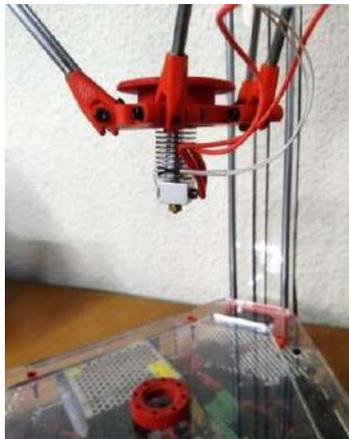


Figure 2. Head for FDM printing

As a following step, the design and construction of a new printing head that allows the deposition of different ceramic materials, generating a minimum amount of waste, is proposed. The design of this head should allow changes on the diameter of the nozzle easily as this would facilitate the extrusion of different materials depending on their viscosity. Likewise, after observing the



limitations tied to the pneumatic system, the evaluation of other alternatives, such as an electromechanical system, is proposed.

Keywords: ceramics, delta robot, 3D printing.

Referencias

[1] J. Obonaga, J. Guerrero y C. Hurtado, "DISEÑO DE UNA IMPRESORA 3D BASADO EN EL ROBOT DELTA PARA LA MANUFACTURA DE PROTOTIPOS EN MATERIALES DE TIPO CERAMICO", Santiago de Cali, 2017.

[2] I. Gibson, D. Rosen y B. Stucker, Additive manufacturing technologies, 2nda ed. New York: Springer, 2015.

Agradecimientos

Se agradece a Juan Sebastián Obonaga, Juan David Guerrero y Cristian Hurtado, quienes realizaron el proceso de diseño y construcción de la impresora 3D DCP-UAO y han compartido toda su información con el fin de apoyar este proyecto.



Evolución de Perfil Alar Conducida por Dinámica de Fluidos Computacional

Wing Profile Evolution driven by Computational Fluid Dynamics

Oscar Ruiz Salguero^{1,γ}, José L. Hernández¹, Cristian C. Rendon¹, Carlos A. Alvarez², Mauricio Toro³

¹Laboratory of CAD CAM CAE, U. EAFIT, Medellín, Colombia.

²Fluid Dynamics Laboratory, U. EAFIT, Medellín, Colombia.

³GIDITIC Research Group, U. EAFIT, Medellín, Colombia.

γ. Autor correspondal: oruiz@eafit.edu.co

Resumen

En el dominio de mecánica de fluidos, el problema de optimización de forma es relevante porque es esencial incrementar la fuerza de elevación y reducir la de arrastre en un cuerpo inmerso en un fluido. El estado del arte actual consiste en dos variantes: (1) evolución a partir de una estimación inicial usando optimización para lograr un efecto específico, (2) creación y crianza genética de individuos aleatorios. Estos enfoques logran formas óptimas y evidencian la respuesta bajo la variación de parámetros. Sus desventajas son la necesidad de una solución aproximada y / o la generación de individuos por ensayo - y - error. En respuesta a esta situación, este manuscrito presenta un método que usa indicadores de Mecánica de Fluidos (e.g. curvatura en líneas de corriente, diferencia de presión, zonas de velocidad cero) para dirigir la evolución de un individuo (en este caso un perfil de ala). Se presenta una estrategia pragmática que imita las acciones de un artesano (conocedor de un dominio técnico en específico) para mejorar la forma. Nuestra aproximación no es general y no está completamente automatizada. Sin embargo, presenta eficiencia al alcanzar perfiles de alas con el desempeño deseado. Nuestra aproximación presenta la ventaja de tener un dominio y reglas de aplicación específicas para realizar la optimización, en contraste con la administración genérica de la evolución.

Palabras clave: Evolución de forma; perfil alar; Mecánica de Fluidos.

Abstract

In the domain of fluid dynamics, the problem of shape optimization is relevant because is essential to increase lift and reduce drag forces on a body immersed in a fluid. The current state of the art in this aspect consists of two variants: (1) evolution from an initial guess, using optimization to achieve a very specific effect, (2) creation and genetic breeding of random individuals. These approaches achieve optimal shapes and evidence of response under parameter variation. Their disadvantages are the need of an approximated solution and / or the trial - and - error generation of individuals. In response to this situation, this manuscript presents a method which uses Fluid Mechanics indicators (e.g. streamline curvature, pressure difference, zero velocity neighborhoods) to directly drive the evolution of the individual (in this case a wing profile). This pragmatic strategy mimics what an artisan (knowledgeable in a specific technical domain) effects to improve the shape. Our approach is not general, and it is not fully automated. However, it shows to efficiently reach wing profiles with the desired performance. Our approach shows the advantage of application domain - specific rules to drive the optimization, in contrast with generic administration of the evolution.

Keywords: Shape evolution; wing profile; Fluid Mechanics.



Referencias

- [1] A. Fathi and A. Shadaram, “Multi-level multi-objective multi-point optimization system for axial flow compressor 2d blade design,” *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 38, no. 2, pp. 351–364, 2013.
- [2] P. Nørtoft and J. Gravesen, “Isogeometric shape optimization in fluid mechanics,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 48, no. 5, pp. 909–925, 2013.
- [3] E. Immonen, “2d shape optimization under proximity constraints by cfd and response surface methodology,” *Applied Mathematical Modelling*, vol. 41, pp. 508–529, 2017.
- [4] K. Zhao, Z. Gao, J. Huang, and Q. Li, “Aerodynamic optimization of rotor airfoil based on multi-layer hierarchical constraint method,” *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 29, no. 6, pp. 1541–1552, 2016.
- [5] R. Mukesh, K. Lingadurai, and U. Selvakumar, “Airfoil shape optimization using non-traditional optimization technique and its validation,” *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 26, no. 2, pp. 191–197, 2014.
- [6] E. Gillebaart and R. De Breuker, “Low-fidelity 2d isogeometric aeroelastic analysis and optimization method with application to a morphing airfoil,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 305, pp. 512–536, 2016.
- [7] T. Zhao, Y. Zhang, H. Chen, Y. Chen, and M. Zhang, “Supercritical wing design based on airfoil optimization and 2.75 d transformation,” *Aerospace Science and Technology*, vol. 56, pp. 168–182, 2016.
- [8] S. Askari and M. Shojaeefard, “Shape optimization of the airfoil comprising a cross flow fan,” *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, vol. 81, no. 5, pp. 407–415, 2009.
- [9] L. Patruno, M. Ricci, S. de Miranda, and F. Ubertini, “Numerical simulation of a 5: 1 rectangular cylinder at non-null angles of attack,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 151, pp. 146–157, 2016.
- [10] C. Park and S. Lee, “Effects of free-end corner shape on flow structure around a finite cylinder,” *Journal of Fluids and Structures*, vol. 19, no. 2, pp. 141–158, 2004.
- [11] S. Jain, V. D. Bhatt, and S. Mittal, “Shape optimization of corrugated airfoils,” *Computational Mechanics*, vol. 56, no. 6, pp. 917–930, 2015.
- [12] S.-H. Seo and C.-H. Hong, “Performance improvement of airfoils for wind blade with the groove,” *International Journal of Green Energy*, vol. 13, no. 1, pp. 34–39, 2016.
- [13] F. Pérez-Arribas and I. Castañeda-Sabadell, “Automatic modelling of airfoil data points,” *Aerospace Science and Technology*, vol. 55, pp. 449–457, 2016.
- [14] D. SS, V. PMHW et al., “Design of fuselage shapes for natural laminar flow,” NASA Langley Technical Report Server, Tech. Rep., 1986.



- [15] Y. Ogawa and M. Kawahara, "Shape optimization of body located in incompressible viscous flow based on optimal control theory," *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, vol. 17, no. 4, pp. 243–251, 2003.
- [16] Y. A. Cengel, J. M. Cimbala, V. C. Olguín, and S. F. Skarina, *Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill São Paulo, 2006, vol. 1.
- [17] P. Manfredo, do Carmo. *Differential geometry of curves and surfaces*, 1st ed. Prentice Hall, 1976, chapter 1.
- [18] B. Mohammadi and O. Pironneau, "Shape optimization in fluid mechanics," *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, vol. 36, pp. 255–279, 2004.



Diagnóstico de Fallas Tempranas de Rodamientos en Mecanismos Susceptibles al Desbalanceo y a la Desalineación

“Diagnosis of Early Failures in Bearing on Mechanisms Susceptible to Unbalance and Misalignment”

María Eugenia Moreno Sánchez^{1, γ}, Junes Abdul Villarraga Ossa¹, Ricardo Moreno Sánchez¹

1. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
γ. Autor corresponsal: eugenia.moreno@udea.edu.co

Resumen

En este trabajo se estudian los efectos que el desbalanceo y la desalineación causan en los parámetros de vibración de aceleración comúnmente utilizados en el diagnóstico de fallas tempranas de rodamientos. Esta investigación proporciona un parámetro de diagnóstico que se llamó AFC. Las medidas del parámetro AFC son sensibles a la existencia del defecto, pero la desalineación, el desequilibrio y sus interacciones no causan un efecto estadísticamente significativo en sus valores. El propósito de encontrar este parámetro es evitar falsas alarmas o el encubrimiento de fallas en rodamientos en mecanismos susceptibles al desbalanceo y a la desalineación. Entre los métodos estudiados se encuentran: el análisis espectral, el estudio de valores globales de la medición de la aceleración con diferentes procesamientos como la detección de alta frecuencia HFD, la envolvente de aceleración ENV, la curtosis K, el factor de cresta FC, la asimetría de la señal Ske, entre otros parámetros propuestos por los autores. Para realizar la evaluación de los parámetros se construyó un banco experimental y se diseñó un experimento factorial multinivel (2^3) donde los factores fueron: daño del rodamiento, desequilibrio y desalineación. Se realizaron 3 réplicas (24 unidades experimentales).

Palabras clave: Diagnóstico de fallas en rodamientos, desbalanceo, desalineación, medidas de vibración.

Abstract

In this paper we study the unbalance and misalignment effect on the acceleration vibration parameters commonly used in the diagnosis of early bearing failures. This investigation provides a diagnostic parameter called AFC. Measurements of the AFC parameter are sensitive to the existence of the defect, however, misalignment, unbalance and their interactions do not cause a statistically significant effect in their values. The purpose of finding this parameter is to avoid false alarms or cover up faults in bearings in mechanisms susceptible to unbalance and misalignment. Among the methods studied were: the spectral analysis, the study of global values of the acceleration measurement with different processing such as the high frequency detection HFD, the acceleration envelope ENV, the kurtosis K, the crest factor FC, the asymmetry of the signal Ske, among others parameters proposed by the authors. In this regard, an experimental device was built and a multilevel factorial experiment (2^3) was designed where the factors were: bearing damage, unbalance and misalignment. 3 replicates were performed (24 experimental units).

Keywords: Diagnosis of bearing failures, unbalance, misalignment, vibration measurements.



Referencias

- [1] C. Scheffer y P. Girdhar, «Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance», *Mach. Vib. Anal. Predict. Maint.*, pp. 115-124, 2004.
- [2] T. Williams, X. Ribadeneira, S. Billington, y T. Kurfess, «Rolling element bearing diagnostics in run-to-failure lifetime testing», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 15, n.º 5, pp. 979-993, 2001.
- [3] F. Cong, J. Chen, G. Dong, y M. Pecht, «Vibration model of rolling element bearings in a rotor-bearing system for fault diagnosis», *J. Sound Vib.*, vol. 332, n.º 8, pp. 2081-2097, 2013.
- [4] B. Graney y K. Starry, «Rolling element bearing analysis crosses threshold», *Mater. Eval.*, vol. 70, n.º 1, pp. 78-85, 2011.
- [5] A. Castellino, P. Donolo, G. Bossio, C. De Angelo, y G. García, «Diagnóstico de fallas en los rodamientos de motores eléctricos empleando variables eléctricas», en *XII Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Contro.*, 2007, p. 6.
- [6] I. El-Thalji y E. Jantunen, «Dynamic modelling of wear evolution in rolling bearings», *Tribol. Int.*, vol. 84, pp. 90-99, 2015.
- [7] SKF Realiability Systems, «Vibration Diagnostic Guide», *SKF Realiability Sist.*, vol. CM5003, 2002.
- [8] L. Ciupitu, A. Tudor, D. Turcan, y D. Sandor, «Vibration Diagnosis of Electric Motor's Bearings», *Adv. Mater. Res.*, vol. 463-464, pp. 1725-1728, 2012.
- [9] M. Barratt, «Low speed bearing monitoring a case study of low speed bearing monitoring in a paper board plant», *J. SKF @ptitud Exch.*, 2002.
- [10] J. Wei, «General alarm Guidelines for Enveloped Acceleration Measurements», *SKF Realiability Syst.*, 2003.
- [11] M. Behzad, A. AlandiHallaj, A. Bastami, B. Eftekharnjad, B. Charnley, y D. Mba, «Defect size estimation in rolling element bearings using vibration time waveform», *Insight Non-Destructive Test. Cond. Monit.*, vol. 51, n.º 8, pp. 426-430, 2009.
- [12] S. Kulkarni y A. Bewoor, «Vibration based condition assessment of ball bearing with distributed defects», *J. Meas. Eng.*, vol. 4, n.º 2, 2016.
- [13] N. Tandon y B. Nakra, «Detection of defects in rolling element bearings by vibration monitoring», *Inst. Eng. (India), Journal, Mech. Eng. Div.*, n.º 0020-3408, pp. 271-282, 1993.
- [14] H. Martin y F. Honarvar, «Application of statistical moments to bearing failure detection», *Appl. Acoust.*, vol. 44, n.º 1, pp. 67-77, 1995.
- [15] D. Dyer y R. Stewart, «Detection of Rolling Element Bearing Damage by Statistical Vibration Analysis», *J. Mech. Des.*, vol. 100, n.º 2, p. 229, 1978.
- [16] Técnicos Asociados de Charlott, «Cartas de Diagnóstico». [En línea]. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/58748416/carta-de-Charlotte>. [Accedido: 27-oct-2016].
- [17] N. Tandon, «A comparison of some vibration parameters for the condition monitoring of rolling element bearings», *Measurement*, vol. 12, n.º 3, pp. 285-289, 1994.



Integración de Plataforma para la Gestión de Datos en Almacén UNTools Orientada a Industria 4.0 como Sistema Multi-Agente

Platform Integration for the Management of Data in UNTools Warehouse Oriented to Industry 4.0 as a Multi-Agent System

Fabian Humberto Fonseca Aponte¹, Juan David Álvarez Cano¹, Ernesto Córdoba Nieto^{1,γ}, Gabriel José Mañana Guichón¹

1. Cundinamarca, Universidad Nacional de Colombia – DIMA-UN, Bogotá, Colombia
γ, autor correspondiente: ecordoban@unal.edu.co

Resumen

Bajo el paradigma de la cuarta revolución industrial; la trazabilidad y el uso de la información se han constituido como necesidades imperantes en la pequeña, mediana y gran empresa, brindando las herramientas para administrar los procesos y recursos de manera óptima y aumentando la productividad; razón por la cual se está innovando en el desarrollo de sistemas de seguimiento enfocados al internet de las cosas. En el presente artículo se expone la implementación de una plataforma para la gestión de la información con PostgreSQL y ROS [6] dentro del almacén inteligente de herramientas UNTools [8], con la finalidad de brindar respaldo, seguimiento y reportes en procesos de manufactura, y estableciendo los pilares para posteriores aplicaciones de deep learning como mantenimiento predictivo [10] y jerarquización de procesos automáticos [13].

Palabras clave: Base de datos, ROS, modelo de capas, sistema multiagentes, agente inteligente, manufactura flexible.

Abstract

Under the paradigm of the fourth industrial revolution; the traceability and the use of information have been established as needs in the small, medium and large enterprises, providing the tools to manage processes and resources optimally, thus increasing the productivity; which is why there are innovations in the development of tracking systems focused on the internet of things. In this article the implementation of a platform for information management with PostgreSQL and ROS [6] within the intelligent warehouse of tools UNTools [8] is exposed, in order to provide support, monitoring and reporting in manufacturing processes, and establishing the pillars for subsequent deep learning applications such as predictive maintenance [10] and automatic process hierarchy [13].

Keywords: Database, ROS, layer model, multi-agent system, intelligent agent, flexible manufacturing.

Referencias

[1] E. C. Nieto, DIMA-UN, and Universidad Nacional de Colombia, Propuesta en el secuenciamiento de actividades en la integración del ecodiseño y diseño para remanufacturar, no. March. Universidad Nacional de Colombia, 2016.



- [2] E. C. Nieto, P. A. C. Parra, and J. C. P. Díaz, “From e-manufacturing to Internet Product Process Development (IPPD) through remote-labs,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 65, no. 1, 2014.
- [3] F. Civerchia, S. Bocchino, C. Salvadori, E. Rossi, L. Maggiani, and M. Petracca, “Industrial Internet of Things monitoring solution for advanced predictive maintenance applications,” *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 7, pp. 4–12, 2017.
- [4] A. Kanawaday and A. Sane, “Machine Learning for Predictive Maintenance of Industrial Machines using IoT Sensor Data,” no. Figure 2, pp. 4–7.
- [5] J. Wang, L. Qiao, and Y. Qie, “Process Planning Service Model Design for Cloud Manufacturing *,” pp. 1169–1173, 2017.
- [6] W. D. S. Morgan Quigley, Brian Gerkey, *Robots with ROS*. 2015.
- [7] A. V. Kapitanov, “Manufacturing System Flexibility Control,” *Procedia Eng.*, vol. 206, pp. 1470–1475, 2017.
- [8] F. H. Fonseca A., A. F. Borrero G., J. D. Alvarez C., and J. J. Benavides B., “Diseño y construcción del primer prototipo de UNTools basado en ROS, OpenHab y Raspberry PI - Almacén inteligente orientado hacia industria 4.0,” *CIIMA*, p. 9, 2017. [9] Q. Qi and F. Tao, “Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 3585–3593, 2018.
- [10] L. Spendla, M. Kebisek, P. Tanuska, and L. Hrecka, “Concept of predictive maintenance of production systems in accordance with industry 4.0,” *SAMI 2017 - IEEE 15th Int. Symp. Appl. Mach. Intell. Informatics, Proc.*, pp. 405–410, 2017. [11] S. Todd, *Lean Manufacturing*, no. March. 2014.
- [12] M. P. Technology, M. E. Merchant, and S. Consultant, “an Interpretive Review 20 Th Century Us Machining and Grinding Research,” *Rev. Lit. Arts Am.*, 2003.
- [13] M. C. Chou, C. P. Teo, and H. Zheng, “Process flexibility: Design, evaluation, and applications,” *Flex. Serv. Manuf. J.*, vol. 20, no. 1–2, pp. 59–94, 2008.
- [14] K. Michael J., “Architecting The Cloud, design decisions for cloud computing service models (SaaS, PaaS, and IaaS),” Wiley, 2014.
- [15] C. Churcher, *Beginning SQL Queries*. 2008.
- [16] J. Fang, J. Zhao, F. He, and X. Lin, “Design and research of three-layers open architecture model for industrial robot software system,” *2013 IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom.*, pp. 104–109, 2013.



- [17] F. De, P. Zita, L. Antunes, and T. Pinto, Trends in Cyber-Physical Multi-Agent Systems. The PAAMS Collection - 15th International Conference, PAAMS 2017, vol. 619. 2018.
- [18] P. P. Churi, S. Wagh, D. Kalelkar, and M. Kalelkar, "Model-View-Controller Pattern in BI Dashboards: Designing Best Practices," Proc. 10Th Indiacom - 2016 3Rd Int. Conf. Comput. Sustain. Glob. Dev., pp. 2082–2086, 2016.



Pronosupination Mechanism for a Rehabilitation Device of the Upper Extremity

María Guadalupe Contreras Calderón^{1, γ}, Eduardo Castillo Castañeda¹

1. Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada,
Instituto Politécnico Nacional, Querétaro, México
γ. Autor correspondiente: ma.gpe.contreras.c@gmail.com

Abstract

At present, new technologies such as rehabilitation robotics have emerged for physical therapies; it has been shown [1] [2] that using such alternative for rehabilitation the patient's recovery time is reduced, repeatability of the exercises is improved, and the fatigue of the therapist caused by mobilizing heavy limbs is reduced.

The basic exercises for upper extremity therapy are: horizontal flexo-extension of the shoulder (Fig. 1a), flexo-extension of the elbow (Fig. 1b) and pronosupination (Fig. 1c)



Fig. 1. a) Flexo-extension of the shoulder b) Flexo-extension of the elbow c) Pronosupination.

The pronosupination consists of the rotation of the forearm around its longitudinal axis, that introduces a third degree of freedom at level of wrist joint. In this way, the hand, can be placed at any orientation to catch or hold an object. The intermediate position is determined by the thumb up and the palm of the hand inward. The supination position is performed when the palm of the hand is directed upwards with the thumb outwards. The pronation position is performed when the palm of the hand "looks" down and the thumb inwards.

The proposed design for pronosupination consists of an arm support (sling) and a cylinder that allows the rotation of the patient's forearm. The rotation can be done manually or automatically since the patient can turn it with his own fist, or through a motor rotating the cylinder to a desired orientation. Fig. 2 shows the main elements of the pronosupinator design.

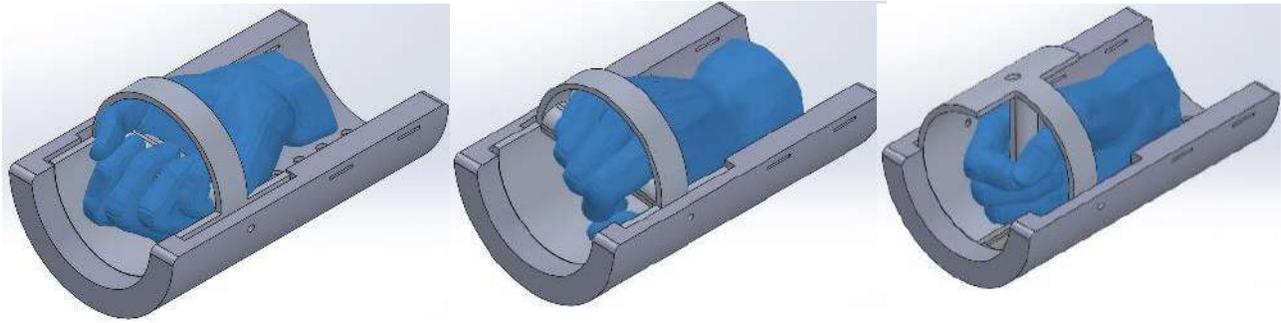


Fig. 2. Pronosupinator design.

The pronosupinator can be provided with an optical sensor adaptable to the end effector of the mechanism, to register the movements made during the therapy and thus be able to provide feedback to the therapist and save the motion in a computer, as well as allowing the patient to interact with a graphical user interface. Fig. 3 shows the pronosupinator mounted on the end effector of a mechanism (provided with two motors M1 and M2) like that of InMotion Arm [3], that the patient can hold and then perform arm therapy.

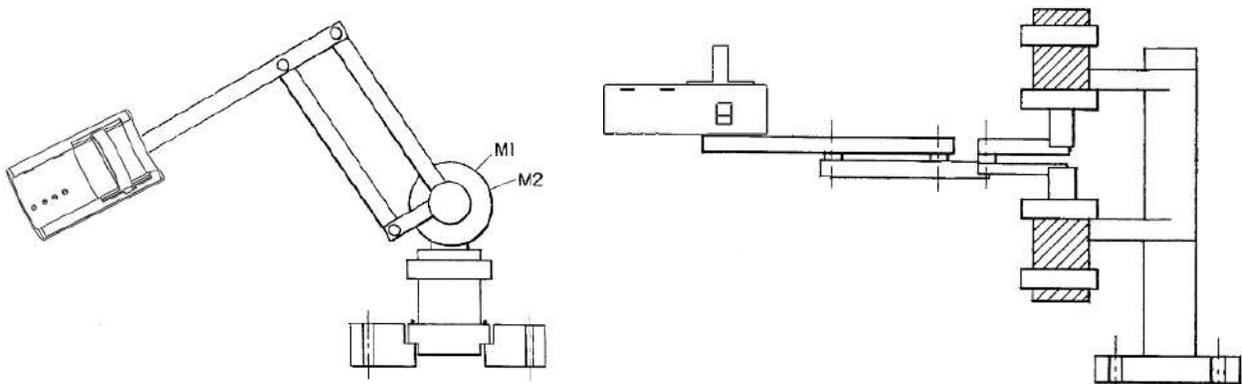


Fig. 3. Pronosupinator at the end effector of a mechanism

Keywords: Pronosupination. Human arm rehabilitation, Medical robotics.

References

- [1] L. Rodríguez-Prunotto, R. Cano-de la Cuerda, A. Cuesta-Gómez, I.M. Alguacil-Diego, F. Molina-Rueda, “Terapia robótica para la rehabilitación del miembro superior en patología neurológica”, *Rehabilitación*, vol. 2, no. 48, pp. 101-128, 2014.
- [2] R. Newport, “Ventajas de la rehabilitación asistida mediante robot en la recuperación de las funciones motriz y visuoespacial en pacientes en fase de recuperación de un accidente cerebrovascular”, *Revista Española de Geriatria y Gerontología*, vol. 41, no. 2, pp. 66-73, 2006.
- [3] Interactive motion technologies, InMotionArm, USA, 2010.



Evaluación de la Resistencia a la Fatiga de Placas de Aleación de Magnesio AZ31B Soldadas por Fricción Agitación

Fatigue Strength Assessment of Friction Stir Welded Plates of Magnesium Alloy AZ31B

Carlos Fernando Luna^{1,2, γ}, Fernando Franco Arenas², Julián Arnaldo Ávila³

1. Universidad Autónoma de Manizales, Colombia

2. Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería, Cali, Colombia

3. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de São João da Boa Vista, SP, Brazil

γ. Autor corresponsal: carlosflunac@autonoma.edu.co

Resumen

En el diseño mecánico de la industria automotriz y aeroespacial es muy importante usar componentes de materiales livianos y resistentes a diferentes condiciones, además estos componentes se deben unir garantizando su calidad, sin embargo, algunos métodos de unión no garantizan la resistencia a la fatiga para aplicaciones de alto rendimiento. Incluso, los procesos de soldadura convencionales por arco eléctrico no ofrecen juntas de calidad. Por lo tanto, en este estudio se evalúa las características mecánicas y su relación con los cambios microestructurales de las uniones de placas de la aleación de Mg AZ31B soldadas por un proceso de soldadura alternativo en estado sólido denominado soldadura por fricción agitación (FSW).

Entre las características mecánicas se estudia la micro dureza, la resistencia a la tracción y a la fatiga, usando un diseño experimental factorial de dos factores y tres niveles para un total de nueve condiciones experimentales. Se analizaron los efectos de la velocidad rotación del husillo (ω) y la velocidad de avance de la soldadura (v) sobre los cambios del tamaño de grano de las soldaduras con respecto al material base (MB), el cambio de dureza en la sección trasversal de la soldadura, la carga máxima a tracción y los ciclos de vida y resistencia a fatiga.

La zona agitada (SZ) en las uniones soldadas por FSW presentaron una microestructura compuesta por granos equiaxiales homogéneos, refinados por recristalización dinámica. Con el aumento de la relación de velocidad (ω / v), se observó que un aumento en el tamaño del grano, el ancho del cordón de soldadura y la resistencia a la fatiga. Los resultados de los ensayos de fatiga y de resistencia mecánica realizadas en esta investigación con una máquina semiautomática superaron los resultados de las soldaduras realizadas con fresadoras convencionales, por lo cual se puede concluir que en los procesos de soldadura controlar los parámetros de ajuste del equipo o máquina de soldadura definen la calidad de las soldaduras resultantes.

Palabras clave: Magnesio AZ31B; propiedades mecánicas, resistencia a la tracción, resistencia a la fatiga; soldadura por fricción-agitación.



Abstract

In the mechanical design of the automotive and aerospace industry it is very important to use components of lightweight materials and resistant to different conditions, in addition these components must be united guaranteeing their quality, however, a few joining methods do not guarantee fatigue strengths for high performance application. Even conventional electric arc welding processes do not offer quality joints. Therefore, in this study the mechanical characteristics and their relationship with the microstructural changes of the AZ31B Mg alloy plate junctions welded by an alternative welding process in the solid state called friction stir welding (FSW) are evaluated.

Among the mechanical characteristics, micro hardness, tensile strength and fatigue are studied, using a factorial experimental design of two factors and three levels for a total of nine experimental conditions. The effects of the rotation speed of the spindle (ω) and the speed of advance of the welding (v) on the changes of the weld were analyzed. The grain size of the welds with respect to the base material (MB), the change of hardness in the cross section, the maximum tensile strength load and the life cycles and strength to fatigue of the weld were analyzed.

The stirred zone (SZ) in the joints welded by FSW presented a microstructure composed of homogenous equiaxed grains, refined by dynamic recrystallization. With the increase in speed ratio (ω / v), an increase in grain size, weld bead width and fatigue resistance were observed. The results of the fatigue and mechanical resistance tests carried out in this investigation with a semiautomatic machine surpassed the results of the welds made with conventional milling machines, for which it can be concluded that in the welding processes the control of the adjustment parameters of the equipment or welding machine define the quality of the resulting welds.

Keywords: Magnesium AZ31B; mechanical properties; fatigue strength; tensile strength; friction stir welding

Referencias

- [1] J.A.D. Ávila, H.E. Jaramillo, A.F. Franco, in: ASME 31 Int. Conf. Offshore Mech. Arct. Eng., ASME, Rio de Janeiro, 2012, pp. 365–370.
- [2] N. Afrin, D.L. Chen, X. Cao, M. Jahazi, Mater. Sci. Eng. A 472 (2008) 179–186.
- [3] P.J. Tubby, M.F. Gittos, D. Staines, D. Nicholas, W. Thomas, Work 2 (2004) 1–12.
- [4] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, 50 (2005) 1–78.
- [5] P. Rambabu, N.E. Prasad, V. V Kutumbarao, (2017).
- [6] S. Ugender, A. Kumar, A.S. Reddy, Procedia Mater. Sci. 6 (2014) 1600–1609.
- [7] E.D. Nicholas, W.M. Thomas, Int. J. Mater. Prod. Technol. 13 (1998) 45–55.
- [8] F. Franco, Ing. Y Compet. 14 (2012) 23–30.
- [9] J. Yang, D. Wang, B.L. Xiao, D.R. Ni, Z.Y. Ma, Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci. 44 (2013) 517–530.
- [10] G. Padmanaban, V. Balasubramanian, Mater. Des. 31 (2010) 3724–3732.



- [11] ASTM International, ASTM E112-13 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, West Conshohocken, PA, 2013.
- [12] ASTM International, E8/E8M-16a Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, United States, 2016.
- [13] ASTM International, E466 Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials, West Conshohocken, PA, USA, 2016.
- [14] U.F.H.R. Suhuddin, S. Mironov, Y.S. Sato, H. Kokawa, C.W. Lee, *Acta Mater.* 57 (2009) 5406–5418.
- [15] J.A. Ávila, A.F. Franco, H.E. Jaramillo, *Rev. Lat. Met. Mat* 32 (2012) 71–78.
- [16] S.M. Chowdhury, D.L. Chen, S.D. Bhole, X. Cao, *Procedia Eng.* 2 (2010) 825–833.



Desarrollo de una Cubierta para Prótesis Utilizando Fibras Naturales

Development of a Cover for Prostheses Using Natural Fibers

María Carolina Sanchez^{1, γ}, Francisco José Mercado¹, Álvaro José Rojas¹, Helmut Alexander Rubio¹.

1. Departamento de Automática y Electrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia.

γ. Autor correspondiente: maria_car.sanchez@uao.edu.co

Resumen

El proyecto inicia analizando la necesidad de trabajar la parte visual y estética de las prótesis de miembros inferiores; esto se debe a que las compañías que se encargan en el desarrollo de prótesis solo se enfocan en darle un buen soporte, mejorar la movilidad y accesibilidad al usuario, dejando de lado la parte visual y estéticas de estas, produciendo molestias e inseguridades a las personas que usan a diario las prótesis. Algunas compañías se han dedicado al diseño de este tipo de accesorios para los usuarios de prótesis, sin embargo resultan extremadamente costosas para un usuario promedio. Por lo anterior, se decidió desarrollar una cubierta para una prótesis de miembro inferior derecho, cuya función es mejorar la apariencia física, utilizando fibras naturales (fique) y resinas.

El desarrollo de la cubierta comenzó por el requerimiento de uno de los profesores de la universidad que posee una prótesis en su miembro inferior derecho, se tomó de modelo el miembro inferior izquierdo con vendas de yeso para luego usar como base. Luego se empezó a trabajar en el diseño de la estructura tomando como inspiración los patrones voronoi para darle una apariencia más orgánica y también con el fin de que sea más agradable a la vista y de igual forma la estructura no genere mayor peso a la prótesis y al usuario.

Ya teniendo el molde de la pierna y los patrones que se fabricaron previamente por corte en láser, se prosiguió a realizar el primer modelo de la estructura con resina y fibras de fique la cual se usó para reemplazar las fibras sintéticas como la fibra de vidrio, para darle una mejor forma a la estructura, mejores propiedades mecánicas, un menor costo y el uso de materiales alternativos y sostenibles para el desarrollo de productos.

El uso de la fibra de fique y la resina parte de un tejido hecho de fibra fique el cual se corta hasta llegar a una geometría similar al del molde creado en yeso y los patrones anteriormente diseñados. Posteriormente este se lleva al molde en yeso y se impregna de resinas gemelas translucidas con el fin de solidificar la fibra y de esta manera garantizar su rigidez. Para lograr un mejor acabado se usó una máquina de vacío para compactar las fibras y la resina. Ya por último teniendo la estructura final, se diseñó un acople utilizando impresión 3D para el ensamble entre la prótesis y la cubierta.

Palabras clave: Cubierta, Prótesis, Fibras Naturales, Resinas.



Abstract

The project begins identifying the need to work on the visual and aesthetic components of lower limb prosthesis. Commonly the companies that are in charge of the design and development of prosthetics are focus in aspects as good support, mobility improvement and user accessibility, leaving aside the visual and aesthetic aspects, causing discomforts and insecurities on the prosthesis users. Also some companies have been dedicated to the design different type of accessories for prosthesis users; however they are extremely expensive for an average user. Because of that a cover for right lower limb prosthesis was developed, using natural fibers (fique) and resins, in order to improve physical appearance.

The first step to develop the cover was identifying some requirements and needs from a professor of the Universidad Autónoma de Occidente, who is a right lower prosthesis user. As a second step a lower left limb model was made by a plaster bandages from his left leg in order to be used as a base model. After that a case for the limb prosthesis inspired voronoi pattern was design, this pattern was implemented to be visually friendly with an organic appearance and also to reduce the weight of case, avoiding nonconformities experiences to the de user.

Having already the leg mold and the patterns that were previously manufactured by laser cutting, the first model of the structure case was made with resin and fique fibers which was used to replace synthetic fibers such as fiberglass, to give a better shape to the structure, better mechanical properties, lower cost and the use of alternative/sustainable materials for the development of products.

The use of the fique fiber begins with a blanket made by fique fiber which its cut with the same geometry of the limb model and the voronoi pattern previously design. A twin resin was used to impregnate in order to solidify the fiber and make it rigid. To achieve a better surface finishes, a vacuum machine was used to compact the fibers and the resin to the mold. Finally, having the final structure, a coupling for the structural assembly between the prosthesis and the cover was designed and made using 3D printing.

Keywords: Cover, Prosthesis, Natural fibers, Resins.

Referencias

- [1] E. Bender y M. Boza, «UNIYQ,» [En línea]. Available: <http://unyq.com/es/es/>.
- [2] M. F. Muñoz Velez, M. A. Hidalgo Salazar y J. H. Mina Hernandez, de *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 2014.
- [3] C. A. Alvarez, «Ciencia al dia,» [En línea]. Available: <http://aupec.univalle.edu.co/informes/mayo97/boletin37/fique.html>.



Investigación Numérica Sobre el Uso de Álabes Multi-Elemento en Turbina Hidrocinética de Eje Horizontal

Numerical Investigation on the Use of Multi-Element Blades in Horizontal Axis Hydrokinetic Turbine

Chica E^{1,γ}, Aguilar J¹, Ainhoa Rubio-Clemente²

¹Departamento de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

²Facultad de Ingeniería, Tecnológico de Antioquia–Institución Universitaria TdeA, Medellín, Colombia.

γ. Autor correspondiente: edwin.chica@udea.edu.co

Resumen

En este trabajo se presenta el dimensionamiento de los álabes de una turbina hidrocinética de 1 kW con 3 álabes con perfiles hidrodinámicos multi-elemento empleando la teoría de Elemento de Álabes (BEM, por sus siglas en inglés). El perfil hidrodinámico usado fue el Eppler 420. La turbina fue diseñada a partir de una velocidad de la corriente de agua de 1,5 m/s, con una relación de velocidad de punta de álabes (λ) de 6,325, un ángulo de paso de la sección del álabes (θ) de 0°, un coeficiente de potencia de 0.4382 y una eficiencia mecánica del 70%. El perfil Eppler 420 multi-elemento fue el seleccionado para el diseño del álabes por presentar una elevada relación entre el coeficiente de elevación y arrastre. Un estudio de computación 2D en el código JavaFoil del perfil Eppler 420 fue realizado con el fin de determinar la longitud de las cuerdas del elemento principal y de la solapa posterior (flap) óptima para un ángulo de deflexión del flap de 30° en condiciones de bajo número de Reynolds.

Palabras clave: álabes multi-elemento, turbina hidrocinética de eje horizontal, análisis hidrodinámico, longitud de cuerda, Javafoil

Abstract

This paper presents the sizing of the blades of a 1 kW hydrokinetic turbine with 3 blades with hydrodynamic multi-element profiles using the Blade Element Momentum theory (BEM). The hydrodynamic profile used was the Eppler 420. The turbine was designed from a water flow velocity of 1.5 m/s with a tip speed ratio of the blade (λ) of 6.325, a pitch angle of the blade section (θ) of 0°, a power coefficient of 0.4382 and a mechanical efficiency of 70%. The Eppler 420 multi-element profile was selected for the design of the blade because it has a high ratio between the lift coefficient and the drag. A 2D computation study in the JavaFoil code of the Eppler 420 profile was carried out in order to determine the optimal lengths of the main element and the optimal flap for a deflection angle of 30° under conditions of low Reynolds number.

Keywords: multi-element blade, horizontal axis hydrokinetic turbine, Hydrodynamic analysis, chord length, JavaFoil

Referencias

[1] M Anyi and B Kirke. "Evaluation of small axial ow hydrokinetic turbines for remote communities". *Energy for Sustainable Development*, vol. 14, n.º 2, pp. 110-116, 2010.



- [2] D Kumar and S Sarkar. “A review on the technology, performance, design optimization, reliability, techno-economics and environmental impacts of hydrokinetic energy conversion systems”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 796-813, 2016.
- [3] HJ Vermaak, K Kusakana and SP Koko. “Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 625-633, 2014.
- [4] M Khan, G Bhuyan, M Iqbal, et al. “Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review”. *Applied Energy*, vol. 86, n.º 10, pp. 1823-1835, 2009.
- [5] M Gney and K Kaygusuz. “Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, n.º 9, pp. 2996-3004, 2010.
- [6] Beri H and Yao Y. “Numerical simulation of unsteady flow to show self-starting of vertical axis wind turbine using fluent”. *Journal of Applied Sciences*, vol. 11, n.º 6, pp. 962-970, 2011.
- [7] J. Zanette, D. Imbault, and A. Tourabi. “A design methodology for cross flow water turbines”. *Renewable Energy*, vol. 35, n.º 5, pp. 997–1009, 2010.
- [8] Chica E, Rubio-Clemente A. “Design of zero head turbines for power generation”. Chapter of book in *Renewable Hydropower Technologies*, ISBN 978-953-51-3382-7. Print ISBN 978-953-51-3381-0. Edited by Basel I. Ismail. Editorial Intech. Published: July 26, 2017, cap. 2, pp. 25-52.
- [9] M Anyi, and B Kirke. “Hydrokinetic turbine blades: Design and local construction techniques for remote communities”. *Energy for Sustainable Development*, vol. 15, n.º 3, pp. 223-230, 2011.
- [10] J Dusek and M Triantafyllou. “Leading edge vortex detection using bio-inspired on-body pressure sensing”, Thesis (S.M.) Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering, pp. 1–116, 2011.
- [11] S.Narsipur & B. W.Pomeroy and M. S.Selig. “CFD Analysis of Multielement Airfoils for Wind Turbines”, *30th AIAA Applied Aerodynamics Conference 25-28 June 2012*, AIAA Paper 2012-2781.
- [12] Adam M. Ragheb, Michael S. Selig. “Multi-Element Airfoil Configurations for Wind Turbines”. *29th AIAA Applied Aerodynamics Conference. 27 - 30 June 2011*, Honolulu, Hawaii.
- [13] Smith, M.S. “High lift aerodynamics”. *Journal of Aircraft*, vol. 12, n.º 6, pp. 501-530, 1975.
- [14] M. Hepperle. “JAVAFOIL User’s Guide [Online]”. Available: <http://www.mh-aerotools.de/airfoils/java/JavaFoil>, 2018.
- [15] Abdullah Muratoglu & M. Ishak Yuce. “Performance Analysis of Hydrokinetic Turbine Blade Sections”, *Advances in Renewable Energy*, vol. 2, pp.,1-10, 2015.
- [16] Hagerman G, Polagye B, Bedard R, et al., “Methodology for estimating tidal current energy resources and power production by tidal in-stream energy conversion (TISEC) devices”, *Rep. EPRI-TP-001 NA Rev 2, Electr. Power Res. Inst., Palo Alto, CA 2006*; 1-57.
- [17] E. Chica, F. Pérez and A. Rubio-Clemente. “Rotor structural design of a hydrokinetic turbine”. *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 11, n.º 4, pp. 2890-2897, 2016.



- [18] E. Chica, F. Pérez, A. Rubio-Clemente and S. Agudelo. “Design of a hydrokinetic turbine”. *WIT Transactions on Ecology and The Environment. Wessex Institute of Technology*, vol. 195, pp. 137-148, 2015.
- [19] Valentini, M., Ofeigsson, T., and Raducu, A. “Control of a variable speed variable pitch wind turbine with full scale power converter”. Institute of Energy Technology , Aalborg Universitet, 2007.
- [20] J F Manwell, JG McGowan and AL Rogers. “Aerodynamics of Wind Turbines”. In: J. F Manwell, JG McGowan and AL Rogers (eds) *Wind energy explained: theory, design and application*. 2th ed. UK: John Wiley & Sons 2009, cap. 3, pp. 91-155.
- [21] Rhie, C. M. and Chowt, W. L. “Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation”. *AIAA JOURNAL*, vol 21, 1525–1530. 1983.
- [22] Juanmian Lei, Feng Guo, Can Huang. “Numerical study of separation on the trailing edge of a symmetrical airfoil at a low Reynolds number”. *Chinese Journal of Aeronautics*, vol 26, n.º 4, 2013, Pages 918-925.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de COLCIENCIAS y la Universidad de Antioquia para la realización de este trabajo.



Diseño e Implementación de un Sistema de Extrusión de Filamento para Impresión 3D a Partir de Botellas Recicladas

Design and Implementation of a Filament Extrusion System for 3D Printing from Recycled Bottles

Guillermo Andrés Lombana Gómez¹, Giancarlo Ramos Espinosa¹ y, Álvaro José Rojas Arciniegas¹

1. Departamento de Automática y Electrónica, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia

y. Autor corresponsal: giancarlo.ramos@uao.edu.co

Resumen

Este trabajo presenta el diseño y la implementación de un sistema capaz de transformar el reciclaje de botellas y material plástico en filamento para suplir la impresión 3D con el fin de que las personas tengan la materia prima para hacer realidad sus diseños, mientras se contribuye a la construcción de bases tecnológicas en algunos sectores marginados en la ciudad de Santiago de Cali como lo es el distrito de Aguablanca¹.

El proyecto consta en el desarrollo de tres etapas de procesamiento de material reciclado: por una parte está la etapa de triturado de los recipientes reciclados en la cual se busca convertir los recipientes en trozos pequeños utilizando un sistema de cuchillas capaz de despedazar los contenedores, el diseño se propone con un motor-reductor monofásico de 0,5 hp acoplado al eje de movimiento de las cuchillas que cortarán el material y se filtrará su tamaño por medio de un tamiz ubicado en la parte inferior para el posterior uso en la fase de extrusión del material plástico.



Figura 1. Sistema de triturado de recipientes.

¹ Distrito de la ciudad de Santiago de Cali localizado al Oriente de la ciudad.



Por otra parte, está el sistema de extrusión de plástico anteriormente triturado sacando de este módulo el filamento de insumo para una impresora 3D, este consta de un extrusor guiado por un tornillo sin fin en el cual se derrite y se empuja el material por la boquilla del diámetro estándar de 1,75 mm utilizando un controlador para la regulación de temperatura de resistencias térmicas que son las generadoras del calor y separadas del sistema de control por medio de un módulo relé. Actualmente se realizan pruebas de extrusión con los materiales plástico más comunes en el reciclaje: PET, HDPE, PP y PS.



Figura 2. Sistema de extrusión de material.

La tercera etapa se encuentra en proceso de desarrollo y hace referencia al sistema de enrollado de filamento, el cual en amplia descripción consta de un sistema guía que toma el filamento extruido del anterior módulo y lo encamina por medio de un sistema tornillo tuerca que permite direccionar el material a lo largo del carrete que estará girando por medio de un motor.

Este proyecto busca reducir los costos de los insumos para los sistemas de impresión 3D para que sean más asequibles a personas de escasos recursos y que pueden encontrar en estos sistemas de manufactura una alternativa para crear objetos con un valor agregado y pueda convertirse incluso en una fuente de ingresos para ellos.

A la fecha se han realizado prototipos funcionales que trituran las botellas recicladas y extruyen el material plástico, probado con materiales como el HDPE, PP y PET y se está desarrollando el módulo de enrollamiento para filamento que sale directamente del extrusor.

Palabras claves: Triturado, extrusión, filamento, reciclaje.



Abstract

This work presents the design and implementation of a system capable of transforming the recycling of bottles and plastic material into filament to supply 3D printing so that people have the raw material to make their designs come true, while contributing to the construction of technological bases in some marginalized sectors in the city of Santiago de Cali, such as the Aguablanca district.

The project consists in the development of three stages of processing of recycled material: on the one hand there is the crushing stage of the recycled containers in which it is sought to convert the containers into small pieces using a system of blades able to tear the containers, the design is proposed with a 0.5 hp single-phase motor-reducer coupled to the movement axis of the blades that will cut the material and its size will be filtered by means of a sieve located in the lower part for the later use in the extrusion phase of the plastic material.



Figure 1. Container grinding system.

On the other hand, there is the plastic extrusion system previously crushed by removing from this module the input filament for a 3D printer, this consists of an extruder guided by a worm in which it melts and pushes the material through the nozzle of the standard diameter of 1.75 mm using a controller for the temperature regulation of thermal resistances that are the heat generators and separated from the control system by means of a relay module. Extrusion tests are currently carried out with the most common plastic materials used in recycling: PET, HDPE, PP and PS.



Figure 2. Extrude material system.

The third stage is in the process of development and refers to the filament winding system, which in broad description consists of a guidance system that takes the filament of the extruder and routing by means of a screw-nut system that allows directing the material along the reel that will be rotating by means of a motor.

This project seeks to reduce the costs of supplies for 3D printing systems so that they are more accessible to people with low resources and who can find in these manufacturing systems an alternative to create objects with added value and that they can use even in a source of income for them.

To date functional prototypes have been made that crush the recycled bottles and extrude the plastic material, tested with materials such as HDPE, PP and PET and the winding module for filament that is sold directly from the extruder is being developed.

Keywords: Crushing, extrude, filament, recycling.

Referencias

[1]. G. Emily. Factores históricos que contribuyeron a la desigualdad en el desarrollo de la ciudad de Cali, en detrimento del distrito de Aguablanca. 2015. ICESI, Cali. Rescatado de: https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/79066/1/TG01130.pdf el 16/08/2018.



Confiabilidad Desde el Diseño de Equipos Industriales

Reliability from the Design of Industrial Equipment

Wilmer Guevara¹, July Andrea Gómez Camperos^{2, γ}, Fernando Jesús Regino Ubarnes²

1. Grupo de investigación GINDET, Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Colombia.
 2. Grupo de investigación INGAP, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Colombia.
- γ. Autor correspondiente: jagomezc@ufps.edu.co.*

Resumen

Al realizar mantenimiento con un concepto actual no implica reparar el equipo averiado tan pronto como se pueda, sino mantener el equipo en operación, cumpliendo de forma confiable con su función de acuerdo a los estándares deseados. En tal sentido el mantenimiento tiene el objetivo de conseguir el máximo nivel de efectividad en el funcionamiento del sistema productivo o de servicios, con el mejor uso de los recursos, y el menor impacto hacia el medio ambiente, la seguridad de las personas e instalaciones y al menor costo posible.

El aumento en los niveles de calidad, efectividad y productividad que han alcanzado los procesos industriales hoy en día, ha estado acompañado también de un aumento en la complejidad de los equipos y sistemas, y en los riesgos asociados a su operación; por lo que se ha implementado metodologías y herramientas que le permitan garantizar un desempeño confiable de los procesos. La mayoría de estas herramientas y metodologías buscan alcanzar la mejor relación costo/riesgo/beneficio en las acciones emprendidas para conservar o restablecer la función de los activos, logrando un análisis de los patrones de falla de los principales elementos que componen el equipo y del impacto de su función en la operación [1].

Sin embargo, no todos los patrones de falla de un activo pueden ser manejados fácilmente a través de las actividades de mantenimiento efectuadas después de su fabricación y puesta en marcha, por lo que la eliminación de ciertas necesidades de mantenimiento debería abordarse desde las mismas fases de diseño del activo, para evitar que al usuario en la operación se le presenten fallas de alto impacto (en términos de producción, calidad, seguridad, ambiente, costos, entre otros), difíciles de identificar y atacar. Esto involucra llevar conceptos y herramientas propias del mantenimiento industrial, a la gestión de los proyectos de diseño de equipos y procesos.

En concreto, los proyectos de diseño de equipos industriales tienen por objetivo el desarrollar un activo capaz de desempeñar de forma confiable y segura la función deseada por el usuario, para lograr lo anterior es necesario tomar en primer lugar un conjunto de previsiones en la fase de diseño, que permitan garantizar al usuario que los patrones de falla de los diferentes elementos que componen el equipo podrán ser atendidos con actividades de mantenimiento que ofrezcan una correcta relación costo/riesgo/beneficio, y luego del diseño la planificación y ejecución de un plan de mantenimiento ajustado a las necesidades reales del activo en su contexto.



La presente investigación consiste en comprender la importancia de la confiabilidad desde el diseño de equipos industriales a través de una herramienta para evaluar el factor de confiabilidad tomando en cuenta las posibles fallas en un equipo y su impacto sobre la operación, para definir actividades de mantenimiento que permitan mejorar la confiabilidad a partir de acciones que pudiesen estar relacionadas incluso con el diseño o rediseño de un activo.

El sistema de confiabilidad propuesto permite el uso de diversas herramientas que pueden ser incorporadas en las etapas preliminares del diseño, con la finalidad de identificar fallas y riesgos potenciales que de acuerdo a su severidad y probabilidad de ocurrencia, que deban ser tratadas mediante políticas adecuadas.

Palabras clave: diseño conceptual, mantenimiento, metodología, confiabilidad, fallas, Raptor.

Abstract

When carrying out maintenance with a current concept does not involve repairing the damaged equipment as soon as possible, but keeping the equipment in operation, reliably fulfilling its function according to the desired standards. In this regard, maintenance aims to achieve the highest level of effectiveness in the operation of the productive system or services, with the best use of resources, and the least impact on the environment, the safety of people and facilities and at the lowest possible cost.

The increase in the levels of quality, effectiveness and productivity that industrial processes have reached today, has also been accompanied by an increase in the complexity of equipment and systems, and in the risks associated with their operation; therefore, it has implemented methodologies and tools that allow it to guarantee a reliable performance of the processes. Most of these tools and methodologies seek to achieve the best cost / risk / benefit ratio in the actions undertaken to conserve or restore the function of the assets, achieving an analysis of the failure patterns of the main elements that make up the team and the impact of its function in operation[1].

However, not all failure patterns of an asset can be easily managed through the maintenance activities carried out after its manufacture and start-up, so that the elimination of certain maintenance needs should be addressed from the same phases of maintenance. design of the asset, to avoid that the user in the operation is presented with high impact failures (in terms of production, quality, safety, environment, costs, among others), difficult to identify and attack. This involves bringing concepts and tools from industrial maintenance, to the management of equipment and process design projects.

In particular, industrial equipment design projects are aimed at developing an asset capable of reliably and safely performing the function desired by the user, in order to achieve the foregoing it is necessary to first take a set of forecasts in the phase of design, that allow the user to guarantee that the failure patterns of the different elements that make up the equipment can be taken care of with maintenance activities that offer a correct cost / risk / benefit ratio, and then design the planning and execution of a plan of maintenance adjusted to the real needs of the asset in its context.



The present investigation consists of understanding the importance of the reliability from the design of industrial equipment, through a tool to evaluate the reliability factor taking into account the possible failures in a team and its impact on the operation. This in order to define maintenance activities that allow improving reliability based on actions that could be related to the design or redesign of an asset.

The proposed reliability system allows the use of various tools that can be incorporated in the preliminary stages of the design, with the purpose of identifying faults and potential risks that, according to their severity and probability of occurrence, that must be addressed through appropriate policies .

Keywords: conceptual design, maintenance, methodology, reliability, faults, Raptor.

Referencias

[1] Creus Solé, A. (2005). Fiabilidad y Seguridad. Madrid: Marcombo S.A.



Estudio del Efecto en el Diámetro de Salida de un Tanque Cónico en la Eficiencia de una GVT

Jorge Sierra¹, Alejandro Ruiz¹, Angie Guevara^{1, γ}, Diana González¹, Arley Cardona¹, Alejandro Posada²

1. Antioquia, Instituto Tecnológico Metropolitano ITM, Medellín, Colombia

2. Antioquia, Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia

γ. Autor correspondiente: angieguevara220191@correo.itm.edu.co

Resumen

La energía eléctrica es fundamental para el bienestar social y económico de las comunidades. Los aumentos del consumo de combustibles fósiles, los cuales generan un impacto negativo debido a la extracción de estos recursos naturales han motivado el estudio de nuevas tecnologías verdes, como las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCHs), éstas tienen beneficios económicos por su fácil instalación y mantenimiento, además del beneficio ambiental por su baja emisión de gases, dentro de las PCHs se encuentran las turbinas de vórtice gravitacional (GVT), las cuales están conformadas por una cámara o tanque y un rotor. Las GVT transforman la energía hidrocinetica de los ríos en energía eléctrica a un bajo costo, Además, las pérdidas de energía asociadas a las líneas de transmisión y distribución que usan las grandes centrales hidroeléctricas son mayores que las generadas en los sistemas descentralizados como lo son las GVT, sin embargo, su eficiencia hidráulica es baja, aunque, las GVT pueden aumentar o disminuir la generación de energía eléctrica con el diseño de la misma (geometría). El objetivo de este estudio consiste en determinar mediante simulación computacional la incidencia del diámetro del orificio de salida en el tanque cónico de una GVT en la potencia generada. Dos (2) turbinas de tanque cónico con orificios de salida de 135 mm (*caso 1*) y 167 mm (*caso 2*) fueron modeladas en el programa Ansys Space Claim® V19.1, el presente estudio usa el método de volúmenes finitos en el programa Ansys Fluent® V19.1, las ecuaciones de gobierno son discretizadas por el método mencionado anteriormente, además para resolver dichas ecuaciones se utiliza el método SIMPLE, con un criterio de convergencia de $1E^{-4}$. Las condiciones de operación se configuran constantes para ambos modelos, para un fluido bifásico conformado por aire y agua con propiedades a 25° Celsius y 1 atm de presión. La Figura 1, muestra las condiciones de frontera para la turbina (la entrada, la salida, el muro y la intemperie).

La discretización del volumen de control es realizada en el programa Ansys ICEM CFD® V19.1, para la malla se eligieron elementos tetraédricos, el *caso 1* cuenta con 1132106 elementos y el *caso 2* con 1961424 elementos.

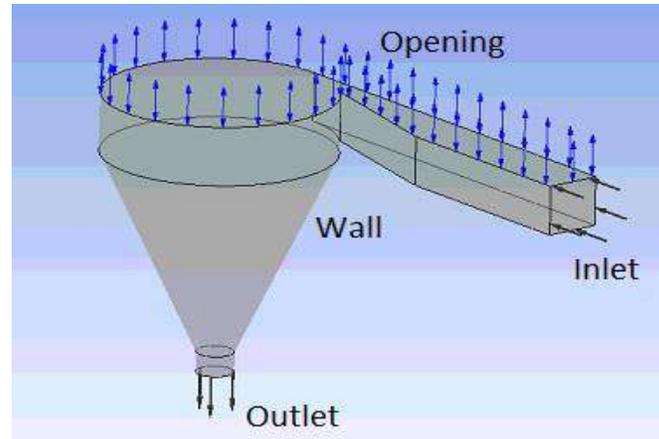


Figura 1 Condiciones de frontera

La discretización del volumen de control es realizada en el programa Ansys ICEM CFD® V19.1, para la malla se eligieron elementos tetraédricos, el caso 1 cuenta con 1132106 elementos y el caso 2 con 1961424 elementos.

Para la simulación se emplea el modelo de turbulencia BSL-EARMS en estado transitorio en un tiempo total de 240 segundos con un paso de 0,01 s. Velocidades a la salida de 0,46 m/s y 0,40 m/s se encuentran para los casos 1 y 2 respectivamente, los resultados demuestran que la turbina con menor diámetro en el orificio de salida del tanque tiene mejor respuesta (velocidad de salida) que el diseño con mayor diámetro en el orificio de salida, debido a su reducción de área aumenta la velocidad final del fluido, en este caso el agua, esto aumenta la potencia eléctrica que se puede aprovechar del sistema y se traduce en mayor generación de energía eléctrica.

Palabras clave: Turbomáquinas, CFD, Ansys CFX®, vórtice gravitacional, tanque cónico, GWVPP

Abstract

Electricity is essential for the social and economic well-being of communities. The increase in the consumption of fossil fuels, which generates a negative impact due to the extraction of these natural resource, has motivated the study about new green technologies, like small hydroelectric power plants (PCH's), these have economic benefits for their easy installation and maintenance, in addition of the environmental benefits for their low emission of gases. The gravitational vortex turbine is found among the set of PCH's, which are made up of a chamber or tank and a rotor. The GVT transforms the hydrokinetic energy of the rivers into electric energy at a low cost, moreover, the losses associated to transmission and distribution lines that use the large hydroelectric plants are higher than the generated ones by decentralized systems like GVT. However, their hydraulic efficiency is low, but, the GVT can increase or decrease with the design of the turbine (geometry). The objective of this study is to determine by computational simulation the incidence of the diameter of the exit orifice in the conical tank of a GVT in the power generated. Two (2) conical



tank turbines with outlet diameter of 135 mm (*case 1*) and 167 mm (*case 2*) were modeled in Ansys Space Claim® V19.1, the present study it uses the finite volume method in the software Ansys Fluent® V19, the governing equations are discretized by the method mentioned above, in addition to solving the equations, the SIMPLE method is used, with a convergence criterion of $1E^{-4}$. The operating conditions are configured constant for both models, for a two-phase fluid, formed by air and water with properties at 25 °C and 1 atm of pressure. Figure 1 shows the boundary conditions for the turbine (inlet, outlet, wall and opening).

The discretization of the control volume is carried out in Ansys ICEM CFD® V19.1, for the mesh tetrahedral elements were chosen, *case 1* has 1132106 elements and *case 2* with 1961424 elements.

For the simulation, the turbulence model BSL-EARMS is used in a transient state in a total time of 240 seconds with a time step of 0.01 s. Output speeds of 0.46 m / s and 0.40 m / s are found for *cases 1* and *2* respectively, the results of the turbine with the smallest diameter in the outlet diameter of the tank have a better response (outlet speeds) that the design with the largest diameter in the output diameter due to its reduction in area, the final velocity of the fluid increases, in this case the water, this increases the electrical power that can be exploited by the system and results in greater generation of electrical energy.

Keywords: Turbomachinery, CFD, Ansys CFX®, gravitational vortex, conical tank, GWVPP



Paneles Fotovoltaicos Térmicos Refrigerados por Disipadores de Calor Modelados Mediante Dinámica Computacional de Fluidos

Thermal Photovoltaic Panels Cooled by Heat Sinks Modeled by Computational Fluid Dynamics

Yustin Roman Ardila^{1, γ}, Jorge Sierra del Rio¹, David Ayala¹, Daniel Sanin¹, Iván Salazar¹

¹ Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Antioquia, Colombia

γ. Autor correspondiente: yustinroman188676@correo.itm.edu.co

Resumen

Estudios realizados experimental y numéricamente han demostrado que uno de los problemas en el uso de las células fotovoltaicas para extraer energía de la luz solar es el efecto de la temperatura, esto debido a que a medida que el panel solar se calienta, la eficiencia de conversión de la luz a la energía eléctrica disminuye.

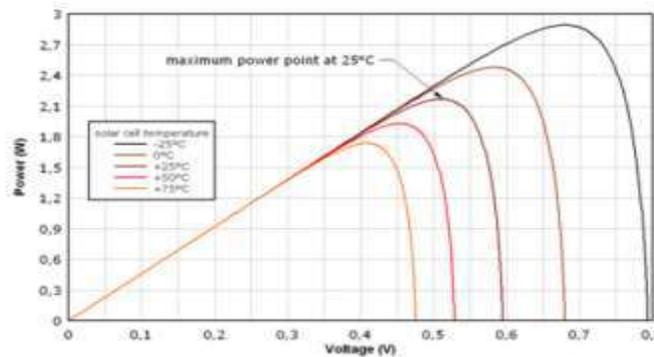


Figura 1. Eficiencia en la conversión de energía en paneles fotovoltaicos en relación a la temperatura [1]

Se realizó un estudio mediante dinámica computacional de fluidos (CFD), utilizando el software ANSYS 18,2, en el cual se modeló la transferencia de calor entre un panel solar con disipador de calor con el objetivo de analizar el comportamiento de la temperatura en la celda solar y como esta afecta la eficiencia en la generación de energía.

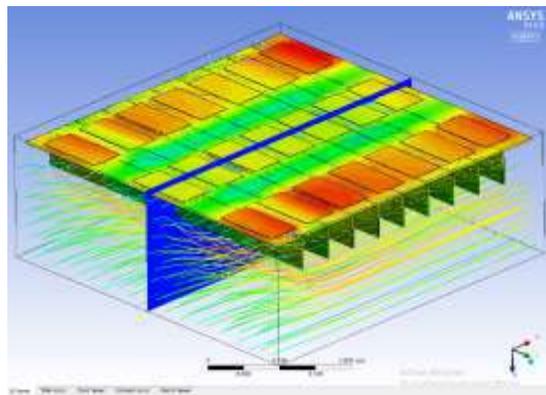


Figura 2. Modelo Mediante dinámica Computacional de Fluidos



En este estudio se tomaran diferentes geometrías con diferentes medidas de alto del disipador y posición, las celdas solares están fijas a la pared superior con espesor de 0,0003 m. Además, se presentan las geometrías de los disipadores de calor de 25mm y 50mm de alto y con espesor de 1mm.

Se emplea el método de resistencias térmicas como modelo teórico para comparar los resultados computacionales y calcular el número de aletas necesarias para mantener la temperatura de operación sobre la base de la celda, adicionalmente se toma la eficiencia teórica de un arreglo de aletas rectangulares.

En estas se usa un sistema de dos resistencias en serie que representan la resistencia térmica entre la fuente y el disipador, y la resistencia térmica del mismo, y dos resistencias en paralelo representan la convección simultánea desde el área de las aletas y la superficie libre de la base de las mismas.

Las condiciones de frontera del sistema más importantes a configurar son la radiación solar, el fluido, el material, la velocidad del aire y la temperatura, para desarrollo de la simulación, observando que los valores arrojados, presentan una buena aproximación al modelo matemático, donde se tienen errores máximos de 8%. Por lo tanto, el método propuesto presenta una validez confiable, para replicar en otros casos.

Temperatura Celda Teórica	Temperatura Computacional	Error
359,78	336,95	6,8%
357,22	390,1	8,4%
357,22	363,36	1,7%
352,83	353,5	0,2%
346,22	341,06	1,5%
338,69	331,35	2,2%
357,22	350,34	2,0%
352,83	337,57	4,5%
346,22	325,12	6,5%
338,69	317,1	6,8%

Tabla1. Comparación teórica contra experimental

Además se observa que al aumentar el área de transferencia de disipador mejora la temperatura del panel e incrementa en la medida que se tenga mayor cantidad de disipadores por celda, la menor temperatura de 317,1 se obtuvo con el disipador de 50mm y con 8 disipadores por celda.

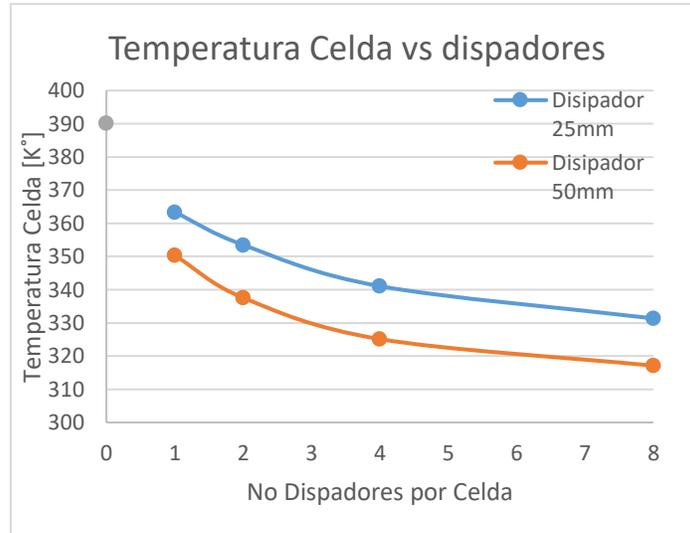


Figura 3. Temperatura en relación al número de disipadores

Palabras clave: Energía solar, CFD, disipadores, eficiencia

Abstract: Experimental and numerical studies have shown that one of the problems in the use of these photovoltaic cells to extract energy from sunlight is the effect of temperature, this because as the solar panel heats up, the conversion efficiency from light to electrical energy decreases.

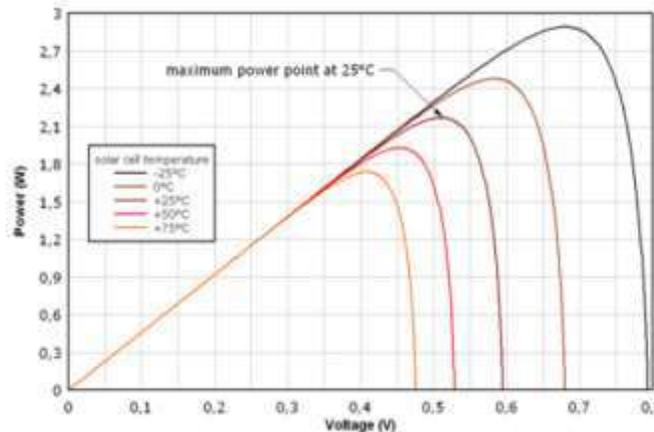


Figure 1. Efficiency in the conversion of energy in photovoltaic panels in relation to temperature [1]

A study was carried out using computational fluid dynamics (CFD), using the software ANSYS 18.2, in which the heat transfer between a solar panel with a heat sink was modeled in order to analyze the behavior of the temperature in the solar cell and how it affects the efficiency in the generation of energy.

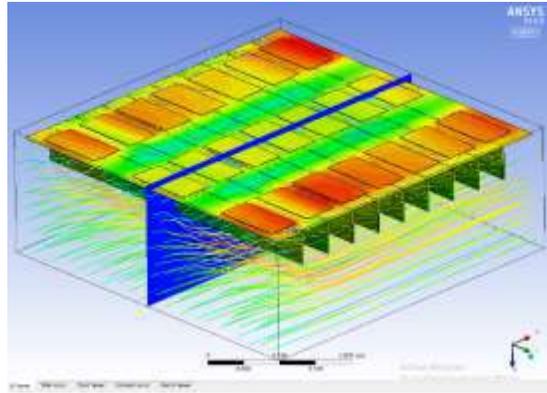


Figure 2. Model through computational fluid dynamics

In this study different geometries will be taken with different measures of the dissipator height and position, the solar cells are fixed to the upper wall with a thickness of 0.0003 m. In addition, the geometries of the heat sinks of 25mm and 50mm of height and with thickness of 1mm are presented.

The thermal resistance method is used as a theoretical model to compare the computational results and calculate the number of fins necessary to maintain the operating temperature on the basis of the cell, additionally the theoretical efficiency of a rectangular fin array is taken, (CFD), using the software ANSYS 18.2, in which the heat transfer between a solar panel with heat sink is modeled in order to analyze the behavior of the temperature in the solar cell and how it affects the generation efficiency of energy.

A system of two resistors in series is used, representing the thermal resistance between the source and the dissipator, and the thermal resistance of the sinks, and two resistors in parallel represent the simultaneous convection from the area of the fins and the free surface of the basis of them.

The most important boundary conditions of the system to be configured are the solar radiation, the fluid, the material, the speed of the air and the temperature, for the development of the simulation, observing that the values shown, present a good approximation to the mathematical model, where there are maximum errors of 8%. Therefore, the proposed method presents a reliable validation, to replicate in other cases.

Temperature Theoretical	Temperature Computacional	Error
359,78	336,95	6,8%
357,22	390,1	8,4%
357,22	363,36	1,7%
352,83	353,5	0,2%
346,22	341,06	1,5%



Temperature Theoretical	Temperature Computacional	Error
338,69	331,35	2,2%
357,22	350,34	2,0%
352,83	337,57	4,5%
346,22	325,12	6,5%
338,69	317,1	6,8%

Table 1. Theoretical versus experimental comparison

It is also observed that increasing the heat sink area improves the temperature of the panel and increases as more heat sinks are generated per cell, the lowest temperature of 317.1 was obtained with the 50mm dissipator and with 8 heat sinks per cell.

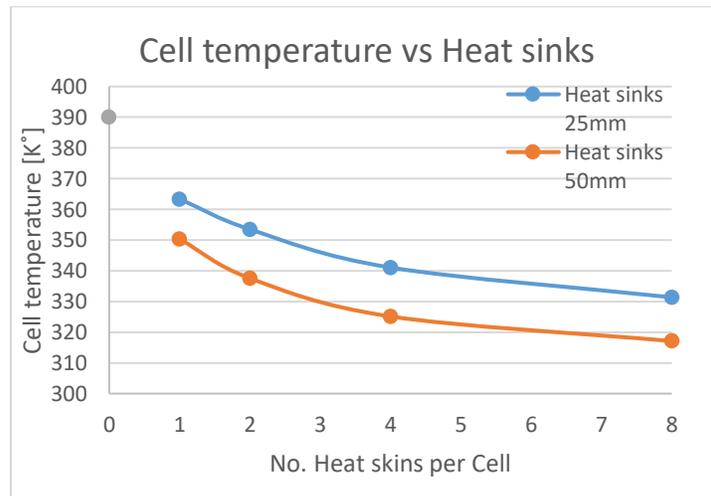


Figure 3. Temperature in relation to the number of heat sinks

Keywords: Solar energy, CFD, sinks efficiency

Referencias

[1] C. G. Popovici, S. V. Hudişteanu, T. D. Mateescu, and N.-C. Cherecheş, “Efficiency Improvement of Photovoltaic Panels by Using Air Cooled Heat Sinks,” *Energy Procedia*, vol. 85, pp. 425–432, Jan. 2016.



Incidencia de la Longitud del Tubo de Mezcla en el Rendimiento de un Ejector Subsónico Vía CFD

Incidence of the Length of the Mixing Tube in the Performance of a Subsonic Ejector Using CFD

Diana I. González Arango^{1, γ}, Jorge Sierra-Del Rio¹, Diego A. Hincapié-Zuluaga¹, Yustin M. Román Ardila¹

1. Instituto Tecnológico Metropolitano, Departamento de Mecatrónica y Electromecánica, Facultad de Ingeniería, Materiales Avanzados y Energía MATyER-Línea de Computación Avanzada y Diseño Digital CADD, Medellín, Antioquia, Colombia.

γ. Autor corresponsal: Dianagonzalez225028@correo.itm.edu.co

Resumen

Los eyectores son dispositivos de gran importancia en procesos industriales como sistemas de extracción de aire y control de atmósferas, en los cuales por las condiciones del aire se hace inviable la implementación de equipos de ventilación tradicionales como ventiladores y/o sopladores, tal es el caso de la industria plástica donde se implementan eyectores para transportar materia prima particulada [1], por lo tanto, es fundamental un elevado rendimiento del proceso, que se puede lograr con una longitud del tubo de mezcla que garantice un perfil de velocidad homogéneo y una alta eficiencia energética determinada por la relación de arrastre que consiste en la razón entre el flujo másico de succión y el flujo másico de arrastre[2]. Los eyectores poseen una construcción simple, fácil instalación, bajo costo y no requieren mantenimiento periódico debido a que no integran partes móviles, su principio de funcionamiento consiste en la inyección de un fluido a alta presión (fluido de arrastre), que al pasar por una boquilla convergente genera una presión de succión que afecta a un fluido secundario (fluido de succión), causando que éste tome la dirección del flujo primario combinándose con él en el tubo de mezcla, para luego ser expulsado a presión atmosférica.

Actualmente para el incremento de la eficiencia en procesos industriales se requiere la aplicación de herramientas computacionales flexibles que permitan probar, modificar y analizar las diferentes variables que pueden influir en el rendimiento del sistema, reduciendo tiempos en fabricación de prototipos y costos de ensayos [3]. Por esta razón, se realizó una simulación CFD (Dinámica Computacional de Fluidos) en ANSYS Fluent 19.0 en un eyector que opera a régimen subsónico [4], con aire como fluido de trabajo, con el objetivo principal de determinar el efecto de la geometría del tubo de mezcla en el rendimiento del dispositivo. Para el desarrollo del estudio se realizaron cinco (5) modelos CAD del eyector en el programa SpaceClaim® correspondientes a las longitudes del tubo de mezcla de 36,06, 219,5, 439, 658,5 y 1097,5 mm. Mediante operaciones booleanas de extracción se establecieron los volúmenes de control asociados al volumen de aire ocupado al interior del eyector. Cada geometría fue mallada garantizando calidades aceptables en parámetros como oblicuidad, ortogonalidad y relación de aspecto, garantizando la independencia de la malla. Para el acoplamiento entre las ecuaciones de velocidad y presión se utilizó el algoritmo SIMPLE, se utilizó el modelo de turbulencia k-epsilon, evaluación transitoria de las ecuaciones, método de inicialización estándar, solución basada en presión y formulación de la velocidad



absoluta [5] y [6], con el fin de determinar las curvas de rendimiento de los eyectores y contrastar cual era más eficiente.

Con los resultados de las simulaciones se conoció el comportamiento del fluido al interior del eyector, se obtuvieron las curvas características numéricas identificando que el modelo que favorece y garantiza la mezcla homogénea entre los fluidos, tiene mejor perfil de velocidad y presenta una mayor eficiencia en cuanto a la relación de arrastre es el de 439 mm, además, se demostró que la metodología de simulación con el programa de CFD sirve como validación numérica.

Palabras clave: CFD, eyector, flujo subsónico, tubo de mezcla, Ansys Fluent®.

Abstract

In industrial processes, Ejectors are very important devices as extraction systems and atmospheric control, where, due to the air conditions, the implementation of traditional ventilation equipment such as ventilators and/or blowers are not feasible, how it happens in the plastic industry where ejector are used to transport particulate raw materials [1], therefore, a high process efficiency is fundamental, which can be achieved with a length of the mixing tube that guarantees a homogeneous velocity profile and a high energy efficiency, determined by the drag ratio consisting of the ratio between the mass flow rate of suction and the mass flow rate of drag [2]. Ejectors have simple construction, easy installation, low cost and do not require periodic maintenance due to the fact that they do not integrate moving parts, its operating principle consists of the injection of high pressure fluid (drag fluid), which, when passing through a convergent nozzle generates a suction pressure that affects a secondary fluid (suction fluid), causing it to take the direction of the primary flow combining with it in the mixing tube, for being expelled at atmospheric pressure.

Now a days, for the increase of efficiency in industrial processes, the application of flexible computational tools that allow to test, modify and analyze the different variables that can influence the performance of the system reducing time in prototype manufacturing and testing costs are required [3]. For this reason, a CFD (Computational Fluids Dynamics) simulation was performed on ANSYS Fluent 19.0 in an ejector operating at a subsonic regime [4], with air as the working fluid, with the main objective of determining the effect of the geometry of the mixing tube in the performance of the device. For the development of the study, five (5) CAD models of the ejector were designed in the SpaceClaim® program corresponding to the lengths of the mixing tube of 36,06, 219,5, 439, 658,5 and 1097,5 mm. Implementing Booleans extraction operations, the volumes of control associated with the volume of air occupied inside the ejector were created. Each geometry was meshed guaranteeing acceptable qualities in parameters such as obliquity, orthogonality and aspect ratio, ensuring the independence of the mesh. The SIMPLE algorithm was used for the coupling between the velocity and pressure equations; k-epsilon turbulence model, transient evaluation of the equations, standard initialization method, pressure-based solution and absolute velocity formulation [5], [6] were used in order to determine the performance curves of the ejectors and contrast which was more efficient.



With the results of the simulations the behavior of the fluid inside the ejector was known, the numerical characteristic curves were obtained identifying that the model that favors and guarantees the homogeneous mixture among the fluids, has a better velocity profile and presents a greater efficiency in terms of the drag relation is the ejector with a length of 439 mm, in addition, the investigation demonstrates that the simulation methodology with the CFD program is useful as a numerical validation.

Keywords: CFD, ejector, subsonic flow, mixing tube, Ansys Fluent®.

Referencias

- [1]. Sun, Da-Wen & Eames, Ian. Recent developments in the design theories and applications of ejectors. *Journal of the Institute of Energy*. 68. 65-79 (1995).
- [2]. Chen, J., Jarall, S., Havtun, H., & Palm, B. A review on versatile ejector applications in refrigeration systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 67–90 (2015).
- [3]. Hedges K R and Hill P G, Compressible flow ejectors, Part I, Development of a finite-difference flow model, *J Fluids Eng, Trans ASME*, pp 272-281. (1974)
- [4]. Keenan J H, Neumann E P and Lusterwerk F. An investigation of ejector design by analysis and experiment. *J Applied Mechanics, Trans ASME*, 72, pp 299-309. (1950)
- [5]. Mazzellia, Little, Garimella, & Bartosiewicz, Computational and experimental analysis of supersonic air ejector: Turbulence modeling and assessment of 3D effects, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Volume 56, Pages 305–316. (2015)
- [6]. Chong D, Hu M, Chen W, Wang J, Liu J, Yan J, Experimental and numerical analysis of supersonic air ejector, *Applied Energy*, 130, pp 679-684. (2014)



Optimización de la Turbina Michell Banki Mediante la Implementación del Método PSO

Optimization of the Michell-Banki Turbine with the Implementation of the PSO Method

Andrés Julián Pérez Rodríguez^{1, γ}, Jorge Andrés Sierra Del Río¹, Steven Galvis Holguín¹

1. Departamento de mecatrónica y electromecánica, Instituto tecnológico metropolitano, Medellín, Colombia

γ. Andrés Julián Pérez Rodríguez: andresperez219964@correo.itm.edu.co

Resumen

La generación de electricidad a partir de fuentes renovables de energía (ER) es un tema que llama la atención de un gran número de investigadores debido de a su alto impacto y necesidad en el mundo actual. Entre las diferentes fuentes de energía renovable, la energía hidráulica es una opción valiosa en numerosos sitios del territorio colombiano[1]. La turbina Michell Banki es una turbina de flujo cruzado que se puede implementar para la generación de energía en zonas no interconectadas(ZNI) o comunidades pequeñas debido a su bajo costo y complejidad en su fabricación[2]. Es una turbina que tiene una eficiencia mejorable y prácticamente invariable con respecto a sus condiciones de caudal, lo que la hace útil en lugares donde el caudal de un río pueda variar según la época del año.

Para mejorar la eficiencia de la turbina a partir de parámetros geométricos como el ángulo de entrada del álabe y la relación de diámetros de la turbina, y otros parámetros de operación como la velocidad angular de la turbina y el ángulo de entrada del agua al rodete, es una estrategia apropiada tener en cuenta ecuaciones que calculen los valores teóricos de su eficiencia[3], aplicando ecuaciones de dinámica de fluidos y análisis de continuidad de la cantidad de movimiento.

Las ecuaciones obtenidas mediante el análisis matemático pueden ser optimizadas con el fin de encontrar los parámetros geométricos que den con el valor máximo de su eficiencia aplicando alguno de los métodos de optimización conocidos, esto en un tiempo mucho menor que el que tomaría un software de fluidodinámica computacional (CFD); entre ellos, el método de optimización por enjambre de partículas (PSO por sus siglas en inglés) es un método que a partir de la réplica del comportamiento de enjambres de animales que buscan comida, encuentra, con una baja carga computacional, el valor óptimo de ecuaciones multivariantes no lineales[4].

El objetivo de esta investigación es encontrar el arreglo de los parámetros geométricos y de operación que obtengan el valor máximo de la eficiencia de una turbina Banki.

La metodología que se ejecuta en la investigación consiste en encontrar las ecuaciones que calculen la eficiencia de la turbina Banki en términos de sus parámetros geométricos y de operación para obtener resultados que se puedan validar con la literatura. Se buscan las restricciones que se deban aplicar a dichas ecuaciones debido al mecanizado de la Banki y se ejecuta en dichas ecuaciones y



sus respectivas restricciones el método de optimización PSO. Finalmente se validan los resultados de la optimización con simulación computacional.

La investigación concluye que el ángulo de entrada del agua a la turbina necesario para obtener el valor óptimo se encuentra en el límite inferior del dominio marcadas por las restricciones, lo que indica que el valor óptimo de la eficiencia se obtendrá por la persona que diseñe un menor ángulo. El valor del ángulo de entrada del aspa varía con respecto al ángulo de entrada del agua a la turbina

Palabras clave: PSO, Banki, Optimización.

Abstract

The generation of electricity using renewable energy is a topic that has drawn attention from many scientists because of its necessity and potentially high impact in today's world. Among the different sources of renewable energy, hydraulic energy is a valuable option in many places in the Colombian territory. The Michell-Banki turbine is a cross-flow turbine which can be implemented to generate energy in unconnected zones or small communities, due to its low cost and ease to manufacture[2]. It is a turbine that has improvable efficiency and almost invariable with respect to the flow rate conditions. This makes the turbine useful in places where the flow rate of a river could vary, depending on the time of year.

To improve the efficiency of the turbine with geometrical parameters like the inlet angle of the blade and the diameter ratio of the turbine, and operational parameters like the angular velocity of the turbine and the inlet angle of the water, it is an appropriate strategy to consider the equations used to calculate the theoretical values of its efficiency, applying equations of fluid-dynamics and continuity.

The equations obtained by mathematical analysis can be optimized in order to find the geometrical parameters that calculate the maximum value of efficiency, applying any recognized optimization method, achieving this in a very short time compared to a computational fluid-dynamics (CFD) method; among them, the Particle Swarm Optimization (PSO) method is a method that, in replicating the behavior of animals who are looking for food, finds the optimum value of multivariable, non-linear equations, using few lines of computational code[4].

The objective of this investigation is to find the array of geometrical and operational parameters which obtain the maximum value of the efficiency of a Banki turbine.

The methodology that is implemented in the investigation consists of finding the equations that calculate the efficiency of the Banki turbine in terms of its geometrical and operational parameters, to obtain results that can be validated with the literature. Any restrictions that must be applied to the equations due to the mechanization of Banki must be found and applied to these equations and to the optimization method (PSO). Finally, the obtained results of the optimization are proved using CFD.

The investigation concludes that the inlet angle of the water needed to obtain the optimum value is found on the limit of the domain, marked by the restrictions. This means that the optimum value



of the efficiency will be obtained by the person who designs the lowest angle. The inlet angle of the blade varies with respect to the inlet angle of the water.

Keywords: PSO, Banki, Optimization.

Referencias

- [1] UPME, *ATLAS POTENCIAL HIDROELÉCTRICO DE COLOMBIA 2015*. Bogotá - Colombia, 2015.
- [2] R. Adhikari and D. Wood, “The Design of High Efficiency Crossflow Hydro Turbines: A Review and Extension,” *Energies*, vol. 11, no. 2, p. 267, 2018.
- [3] A. Michael, “UN ESTUDIO DE LA TURBINA DE FLUJO CRUZADO (EFECTO DEL ÁNGULO DE ATAQUE, ÁNGULO DE ENTRADA DEL ÁLABE Y RELACIÓN DE DIÁMETROS EN LA EFICIENCIA HIDRÁULICA),” vol. M, pp. 1–12, 2013.
- [4] J. Kennedy and R. Eberhart, “Particle swarm optimization,” *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE Int. Conf.*, vol. 4, pp. 1942–1948 vol.4, 1995.



Estado de la Investigación en Energía en Colombia

the Status of the Energy Research in Colombia

Alejandra María Restrepo Franco^{1, γ}, Francy Nelly Jiménez García¹, Luisa Fernanda Echeverry Cardona¹, Luis Fernando Mulcúe Nieto¹, Carlos Fernando Luna Carlosama¹

1. Departamento de Física y Matemáticas, Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, Colombia.

γ. Autor corresponsal: alejandra.restrepof@autonoma.edu.co

Resumen

Colombia genera aproximadamente el 70% de la energía eléctrica con plantas hidroeléctricas debido a la riqueza hídrica con que cuenta, las cuales se ven afectadas por el cambio climático, en específico por los fenómenos del niño y niña [1], que se presentan en el país. En materia de combustibles fósiles, se hace evidente la pronta escasez interna, por ello se evidencia la necesidad de incluir en el suministro energético del país Energías Renovables (ER) en sus diferentes formas [2]. Este panorama energético pone de manifiesto la necesidad de realizar investigaciones en temas energéticos en busca de diversificar la matriz energética, ayudar a afrontar el cambio climático, y cumplir así el acuerdo de Kyoto en el que se ha comprometido el país [3]. Es por ello relevante conocer el estado actual de la investigación que se realiza en Colombia en cuanto a temas de energías.

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos al realizar una revisión del estado actual de la investigación en Colombia en temas de energías y más particularmente en ER. La información se obtuvo desde la plataforma Scienti de Colciencias de los grupos de investigación que se encuentran ubicados en la categoría 13 denominada “Investigación en ingeniería y minería”, de los cuales se seleccionaron los 100 grupos que aparecen en fuentes primarias. La Información fue consultada en el mes de enero de 2018, se procedió a su recopilación, sistematización y análisis, desde tres categorías: ubicación, intereses investigativos y producción científica de los grupos.

En cuanto a la ubicación, se encontró que el 75% de los grupos de investigación en energía se encuentran concentrados en cuatro departamentos del país: Antioquía, Cundinamarca, Santander y Valle del Cauca. Lo anterior puede deberse a la privilegiada ubicación geográfica de tales departamentos lo cual les hace beneficiarios de fuentes hidrográficas importantes; además, al hecho de que en estas regiones se encuentran importantes universidades y corporaciones que dan coberturas a tales grupos: la Universidad de Antioquia, La Universidad Nacional, Universidad Industrial de Santander y la Universidad del Valle, pioneras en la investigación en Colombia, y corporaciones dedicadas al desarrollo tecnológico del país. En cuanto a la clasificación de los grupos, se observa que un 40% están ubicados en los escalafones superiores (A1 y A), el 34% se encuentran en categoría C, el 20 % en la categoría B, un 5% en la categoría D y solo el 1% no esta categorizado.

Los intereses de los grupos son diversos, algunas de las líneas de investigación más destacadas tienen que ver con gestión energética, energía y potencia, energías renovables, biocombustibles y eficiencia energética, entre otras.



En cuanto a la producción científica se encuentra que se han publicado aproximadamente 78 artículos/grupo y 192 artículos/año; en relación a energías renovables se ha publicado solo el 4,43% de la producción total y en ella han participado 58 grupos. De los 348 artículos publicados en ER el 43,3% cuentan con indexación internacional para el año de publicación.

Palabras Clave: Energía y minería, energías renovables, grupos de investigación

Abstract

Colombia generates approximately 70% of the electric power with hydroelectric plants due to its water richness, which are affected by climate change, specifically by El Niño and La Niña phenomena, which occur in the country. In terms of fossil fuels, it is evident the short internal shortage, which is why it is necessary to include in the energy supply of the country Renewable Energy (RE) in its different forms. This energy scenario highlights a need to conduct research on energy issues in search of diversifying the energy matrix, helping to confront climate change, and thus fulfill the Kyoto agreement in which the country has committed. It is therefore relevant to know the current state of the research carried out in Colombia in terms of energy issues.

This paper presents the results obtained by reviewing the current state of research in Colombia on energy issues and more particularly in RE. The information was obtained from the Scienti platform of Colciencias of the research groups that are in category 13 called "Research in engineering and mining", from which the 100 groups that appear in primary sources were selected. The information was consulted in the month of January 2018, then, it was proceeded to its collection, systematization and analysis, from three categories: location, research interests and scientific production of the groups.

Regarding the location, it was found that 75% of the energy research groups are concentrated in four departments of the country: Antioquia, Cundinamarca, Santander and Valle del Cauca. The foregoing may be due to the privileged geographical location of such departments which makes them benefit from important hydrographic sources; in addition, to the fact that in these regions there are important universities and corporations that provide coverage to such groups: the University of Antioquia, La National University, Industrial University of Santander and Universidad del Valle, pioneers in research in Colombia, and corporations dedicated to the country's technological development. Regarding the classification of the groups, it is observed that 40% are in the upper echelons (A1 and A) while 34% are in category C, 20% in category B, 5% in category D and only 1% is not categorized.

The interests of the groups are diverse, some of the most outstanding research lines have to do with energy management, energy and power, renewable energies, biofuels and energy efficiency, among others.

Regarding scientific production, it is found that approximately 78 articles / group and 192 articles / year have been published; in relation to renewable energies, only 4.43% of total production has been published and 58 groups have participated. Out of the 348 articles published in ER, the 43.3% have international indexation for the year of publication.



Keywords: Energy and mining, renewable energy, Research groups.

Referencias

- [1] UPME. (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. Resumen ejecutivo, Bogotá.
- [2] Chien, T. & Hu, J. (2008). Renewable energy: an efficient mechanism to improve GDP. *Energy Policy* 36, 3045-3052.
- [3] Sostenible, M. d. (2018). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Recuperado el 10 de 07 de 2018, de Protocolo de Kioto (pK): <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/458-plantilla-cambio-climatico-14>



Reducción del Costo Computacional en Procesos de Diseño Óptimo al Usar Puntos Heredados.

Computational Cost Reduction in Optimal Design Process Using Inherited Design Points.

Andrés Felipe Uribe Ávila^{1, γ}, Luis Ernesto Muñoz Camargo²

1, 2. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

γ. Autor corresponsal: af.uribe1289@uniandes.edu.co

Resumen

Este trabajo propone una metodología aplicable en procesos de diseño óptimo basados en el uso de modelos con alto costo computacional. El reto en este tipo de casos consiste en usar apropiadamente la información del modelo, de manera que se permita tener la precisión necesaria sin desbordar las capacidades computacionales. El alto costo computacional limita el uso de técnicas de optimización tradicionales.

La metodología de optimización multi-objetivo se basa en el uso de modelos sustitutos [1]. Se propone una estrategia en la que se hereden puntos previamente utilizados, para reducir el uso de los recursos computacionales sin sacrificar la precisión. La herencia de puntos propuesta se combinó con la metodología de superficie de respuesta sucesiva [2] (SRSM). En cada iteración del SRSM se utiliza una sucesión de baja discrepancia como estrategia de muestreo, para luego utilizar el resultado del muestreo en la construcción del modelo sustituto, sobre el cual se realiza la optimización.

Como caso de estudio para probar la metodología, se tomó el diseño de una viga en voladizo sujeta a una carga externa. El resultado obtenido se comparó con varias estrategias basadas en algoritmos evolutivos. Se utilizaron tres indicadores de calidad de los resultados obtenidos, a la vez que se comparaba el costo computacional de cada estrategia.

Los resultados del caso de estudio muestran un camino prometedor para la metodología propuesta. Se usaron 1454 evaluaciones con la metodología propuesta, obteniendo indicadores de calidad superiores a los resultados de las estrategias usadas como comparativo, cuando las mismas utilizan 15000 evaluaciones. Esto representa una reducción de más del 90% del costo computacional, obteniendo a la vez mayor fidelidad en los resultados. La Figura 1 presenta la representación del Frente de Pareto encontrado por la metodología propuesta, así como un caso representativo de la mejor estrategia comparativa usada.

Palabras clave: Diseño multi-objetivo, superficie de respuesta sucesiva, puntos heredados.

Abstract

This research proposes a methodology applicable in optimal design processes based on the use of high-computational cost models. The challenge in this type of cases is to use the information of the model appropriately, having the precision required without overflowing the computational capacities. The high computational cost limits the use of traditional optimization techniques.

The multi-objective optimization methodology is based on surrogate-based optimization techniques [1]. A strategy is proposed in which previously used points are inherited, reducing the use of computational resources without sacrificing accuracy. The proposed inheritance strategy



was combined with the Successive Response Surface Methodology [2] (SRSM). In each iteration of the SRSM, a low discrepancy sequence is used as sampling strategy. The result of the sampling is then used in the construction of the substitute model, on which the optimization is carried out.

As a case study to test the methodology, the design of a cantilever beam subject to an external load was taken. The results obtained were compared with several strategies based on evolutionary algorithms. Three quality indicators of the results obtained were used, along with the comparison of the computational cost of each strategy.

The results of the case study show a promising path for the proposed methodology. 1454 evaluations were used with the proposed methodology, obtaining a response with quality indicators superior to the results of the strategies used as comparative, when they use 15,000 evaluations. This result represents a reduction of more than 90% of the computational cost, obtaining at the same time greater fidelity in the results. Figure 1 presents the representation of the Pareto Front found by the proposed methodology, as well as a representative case of the best comparative strategy used.

Keywords: Multi-objective design, Successive Response Surface Methodology, inherited points.

References

- [1] T. D. Robinson, M. S. Eldred, K. E. Willcox, and R. Haines, "Surrogate-Based Optimization Using Multifidelity Models with Variable Parameterization and Corrected Space Mapping," *AIAA J.*, vol. 46, no. 11, pp. 2814–2822, 2008.
- [2] N. Stander and K. J. Craig, "On the robustness of a simple domain reduction scheme for simulation-based optimization," *Eng. Comput.*, vol. 19, no. 4, pp. 431–450, 2002.

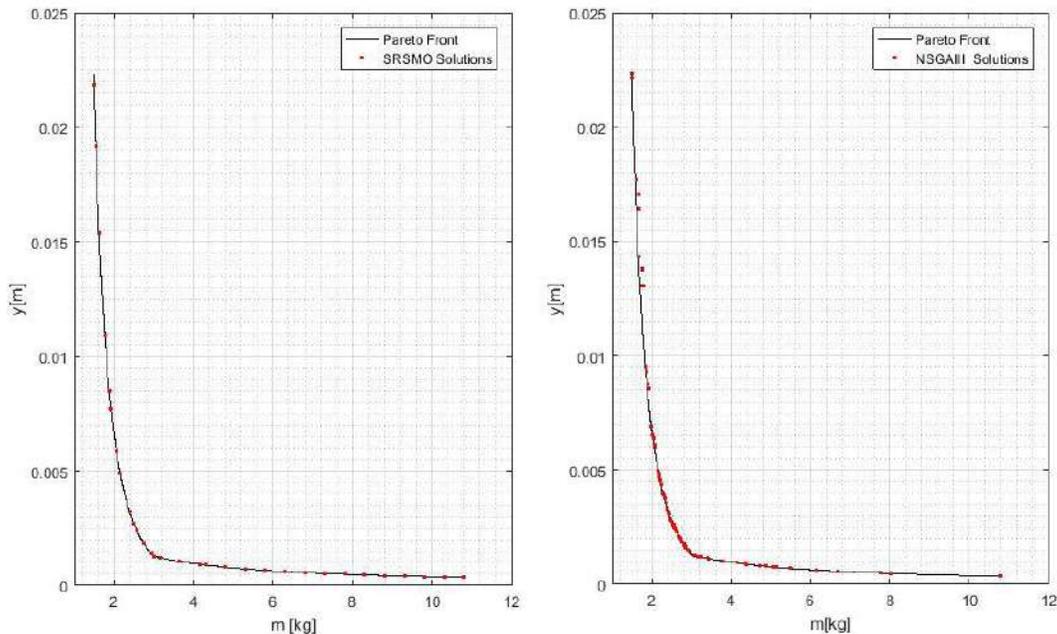


Fig. 1 Frentes de Pareto encontrados. En rojo, soluciones encontradas por el algoritmo. En negro, la mejor representación del frente de Pareto. (a) Metodología Propuesta (b) NSGA-III.



Incidencia de la Geometría en la Demanda de Aire en Conductos de Superficie Libre Usando CFD

Incidence of the Geometry in Air Demand of Free Surface Discharge Conduits Using CDF

Ing(c) Mateo Del Gallego Rico^{1, γ}, Msc Jorge Andrés Sierra Del Rio¹, Phd(c) Diego Andrés Hincapié Zuluaga¹, Msc. Leonardo Mesa

1. Antioquia, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia
γ. Autor corresponsal: mateodel205229@correo.itm.edu.co

Resumen

El correcto diseño de canales de superficie libre con compuertas verticales es muy importante en represas dedicadas a la generación de energía eléctrica, esto previene cavitación, vibración estructural y sobrecostos. En particular dentro de los canales de superficie libre es necesario incorporar aireadores artificiales, especialmente en las zonas de baja presión bajo la compuerta donde la velocidad del fluido puede incrementar el riesgo de daños estructurales. Usando aireadores éste efecto es completa o parcialmente compensado y de la misma forma la cavitación generada aguas debajo de la compuerta es eliminada o llevada a niveles permisibles, previniendo el deterioro de la estructura hidráulica. Aunque muchos proyectos hidroeléctricos se han desarrollado en Colombia, algunos incidentes han ocurrido en relación con la demanda de aire esperada y la real en descargas con compuerta vertical resultando en serios daños estructurales. El problema de la determinación de la demanda de aire para compuertas verticales no ha sido estudiado con mucha rigurosidad debido a la complejidad de los modelos matemáticos que describen la interacción de fluidos multifásicos, tradicionalmente el diseño de los sistemas de aireación han sido creados escalando modelos en los laboratorios, éstos modelos producen diferentes formulaciones empíricas, el problema con esas aproximaciones son las inherentes diferencias entre el prototipo escalado, el modelo y las características geométricas de la estructura. Usando métodos computacionales es posible resolver las ecuaciones para un modelo real y de esta manera obtener resultados más precisos para tener una mejor descripción de los campos de velocidad y presión. El principal objetivo de este estudio es determinar la incidencia de la geometría del canal hidráulico (figura 1 y tabla 1), especialmente el ángulo de descarga aguas debajo de la compuerta vertical en la demanda de aire y realizar una comparación entre el modelo analítico y computacional para caracterizar el efecto de la geometría en las ecuaciones empíricas encontradas en la literatura para diferentes condiciones de operación.

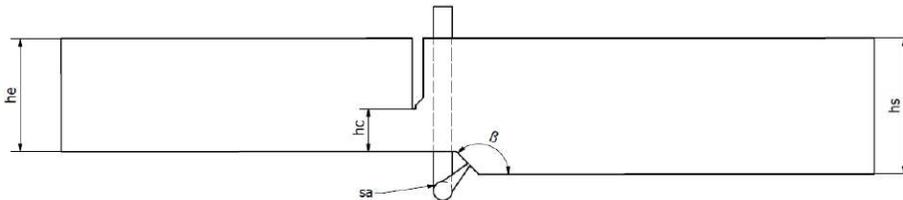


Figura 1. Partes del canal hidráulico.



Parted del canal hidráulico	
Cota	Descripción
he	Altura canal de entrada
hc	Apertura de compuerta
β	Ángulo de descarga
hs	Altura canal de salida
sa	Sistema de aireación

Tabla 1. Descripción del canal hidráulico.

La simulación fue realizada en Ansys Fluent, con ésta se obtiene los campos de presión y velocidad, caudal y fracción volumétrica de agua y aire. Para resolver la interfaz agua-aire es usado el método volumen de fluido (VOF) en modo de canal abierto con configuración de fase dispersa con frontera definida y como modelo de viscosidad SST k-omega. Los resultados mostrados por la simulación computacional dinámica de fluidos (CFD) concluye que la demanda de aire es máxima cuando la apertura de la compuerta es mínima y la presión incrementa, igualmente en todos los casos desarrollados dentro esta investigación el ángulo de descarga es poco significativo, incluso menos que la interacción entre las variables apertura-presión, similar a los resultados obtenidos de manera analítica donde el ángulo no es considerado para resolver las ecuaciones empíricas, la principal diferencia entre el método analítico y computacional es que de manera analítica el coeficiente Beta (caudal de aire (Qa)/ caudal de agua(Qw)) es mucho mayor que el obtenido por el método CFD.

Palabras clave: Cavitación, Sharma, canales de descarga, Fluent.

Abstract

The correct designing of free surface conduits with vertical gates is very important into dams dedicated to electric energy generation, it prevents cavitation, structural vibration and cost overruns. In particular, in free surface flow discharge conduits is necessary to incorporate artificial aerators, especially in low pressure zones down the gate where the speed of the flow inside the hydraulic conduits can increase the risk of structural damages; using aerators this effect is complete or partially compensated and in the same way the amount of cavitation generated downstream the gate is suppressed or reduced to permissible levels, preventing the deterioration of hydraulic structure. Despite the fact that a wide variety of hydroelectric projects have been developed in Colombia, some incidents have occurred in relation with the expected and real air demand in discharging vertical gates resulting in a relevant affectation of environment. The mean problem to determine air demand ratio for vertical gates has been studied by many investigators, but due to the complex of the mathematical methods that describe the multiphase flow interaction phenomenon used to deal with the problem have showed a weak accurate, traditionally the design of aeration systems for flow discharge conduits has been created by scale physical models in laboratories, these models produce different empirical formulations; the problem with these approximations are the inherent differences in a scale prototype, a real model and the geometric characteristics of the structure (figure 1 and table 1). Using computational methods is possible to solve the equations for a real scale model and this way obtain more accuracy results to have a better description of the pressure and velocity fields. The main objective of this study is to determine the incidence of the geometry hydraulic channel, specially of the angle of discharge downstream of the vertical gate, in



the air flow demanded by the aeration system and compare the analytical and computational method in order to characterize the effect of the geometry in empirical equations found in literature for different operation conditions.

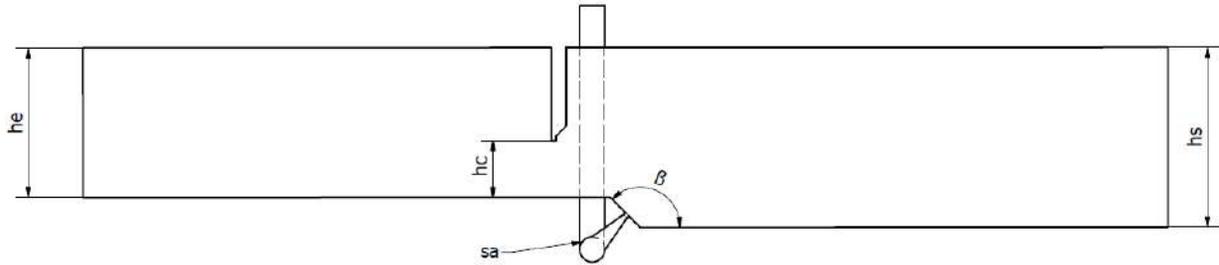


Figure 1. Hydraulic channel parts.

Hidraulic channel parts	
Dimension	Description
he	Inlet height
hc	Gate opening
β	Discharge angle
hs	Outlet height
sa	Aeration sistem

Table 1. Hydraulic channel description.

The numerical simulation was performed in Ansys Fluent, with this is obtained the velocity and pressure fields, flow and volume fraction of water and air. To solve water-air interface is used the volume of flow method (VOF) in open channel mode with configuration of sharp/dispersed and as viscosity model was implemented SST k-omega. The results showed by computational fluid dynamic simulation (CFD) concluded that aeration demand is maxim when the gate aperture is minimum and the pressure rises, likewise in all cases developed over this investigation, the angle of discharge is less significant that the aperture-pressure relation variable, similar to the analytic results when the angle is not considerate to solve the empirical equations, the principal difference between these two methods is that in the analytic method the air flow (Q_a) / water caudal (Q_w) (Beta coefficient Q_a/Q_w) is much bigger than the Beta coefficient obtain by CFD method.

Keywords: Cavitation, Sharma, discharge channels, Fluent.



Control por Rechazo Activo de Perturbaciones en Cascada para Sistemas con Tiempo Muerto y Fallos en Subsistema

On Cascade ADRC for Time-Delay Systems with Subsystem Faults

Carlos D. Escobar-Valbuena¹, Horacio Coral-Enriquez¹

1. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Buenaventura Bogotá, Bogotá, Colombia
γ. Autor corresponsal: carlosdavidescobar@gmail.com

Resumen

Los procesos industriales son sistemas complejos que incluyen gran cantidad de parámetros que asocian los elementos interactuantes del sistema. En estos sistemas, es usual obtener modelos de orden reducido con retardos de tiempo, los cuales se pueden abordar con esquemas de control ya disponibles como el compensador Smith, o bien, con sistemas convencionales mediante la aproximación Padé. Sin embargo, esta simplificación de la dinámica añade ciertos problemas, particularmente en la fase del modelo, la cual limita gravemente la ganancia máxima y, en consecuencia, restringe el desempeño del control. Por otro lado, los sistemas industriales funcionan mediante la correcta sintonización de diversos elementos, esto es, diversas plantas trabajando secuencialmente para un objetivo. Acorde a esto, el correcto funcionamiento de cada uno de los elementos interactuantes del sistema es requerido para lograr el objetivo final del control y una limitante se puede presentar cuando aparecen fallos en los subsistemas. Así pues, se desarrolla una metodología de control basado en el control por rechazo activo de perturbaciones modificado para sistemas con tiempo muerto con tolerancia a fallos pasiva, articulándole sobre sistemas térmicos industriales.

El control por rechazo activo de perturbaciones (ADRC) propuesto por Han [1] promete un cambio de paradigma en diseño de sistemas de control, contemplando las incertidumbres de la dinámica del sistema y las perturbaciones externas como parte de la perturbación total, que puede ser oportunamente rechazada mediante el observador de estado extendido. En consecuencia, se obtiene una metodología de control con una robustez particular que permite centrarse más en el diseño del control y menos en la obtención de un modelo exacto del sistema. Basándose en la propuesta del profesor Gao para el desarrollo de ADRC en sistemas con tiempo muerto [2], se propone un sistema de control para una estructura cascada en la que se atacan de forma pasiva los fallos (cambios en la dinámica) del lazo interno del esquema mientras se asegura estabilidad y seguimiento de referencia en el lazo externo para un sistema con tiempo muerto.

El sistema se valida en simulación para un sistema térmico industrial donde el elemento en falla es una válvula de control para el flujo de combustible que ingresa a los quemadores de la planta: un horno industrial con modelo aproximado por tiempo muerto. El desempeño del sistema se compara con metodologías convencionales de ADRC y se demuestra la superioridad del sistema propuesto frente a variaciones entre la predicción y el valor nominal del tiempo muerto (Fig. 1).

Palabras clave: Control por rechazo activo de perturbaciones, Sistemas con retardo de tiempo, Control tolerante a fallas, Horno.



Abstract

Industrial processes are compound systems that describes the dynamics of a set of interactant elements. In these systems, reduced order model is often conveniently obtained so it can be easily engaged with currently available techniques like the Smith predictor or with regular schemes with Padé approximant. However, this simplification adds some problems to the model phase, which dangerously limits the system maximum gain, thus, the control system performance is degraded. On the other hand, industrial systems work with a correct sync of each of its subsystems, and a limit arise when parts of this conglomerate fail to work properly. In this sense, a control methodology is developed using active disturbance rejection control (ADRC) modified for time-delay systems, adding a passive, fault tolerant control and exemplifying its functioning over simulation with a thermal industrial system.

ADRC, first proposed by Han [1] promises a change in the control systems design paradigm, understanding the system unknown dynamics and the external disturbances as part of the total disturbance, which can be timely rejected through ESO. Accordingly, a control methodology is obtained with such robustness that allows the design to be focused more over the control itself, rather than the system model. Based on the modified ADRC proposed by prof. Gao [2], a cascade control scheme with fault tolerance (change in dynamics) over the inner loop and reference tracking over the external loop for a time-delayed system is proposed.

The system is validated through simulation for an industrial thermal system, in which the fault element is the fuel control valve and the plant is an industrial heat treatment furnace with approximated time-delay model. The performance of the system is equated with regular ADRC techniques and superiority is displayed for variation in nominal and predicted time-delay values (Fig. 1).

Keywords: Active Disturbance Rejection Control, Time-Delay Systems, Fault-Tolerant Control, Furnace.

Referencias

- [1] J. Han, "From PID to Active Disturbance Rejection Control," vol. 56, no. 3, pp. 900–906, 2009.
- [2] S. Zhao and Z. Gao, "Modified active disturbance rejection control for time-delay systems," *ISA Trans.*, vol. 53, no. 4, pp. 882–888, Jul. 2014.

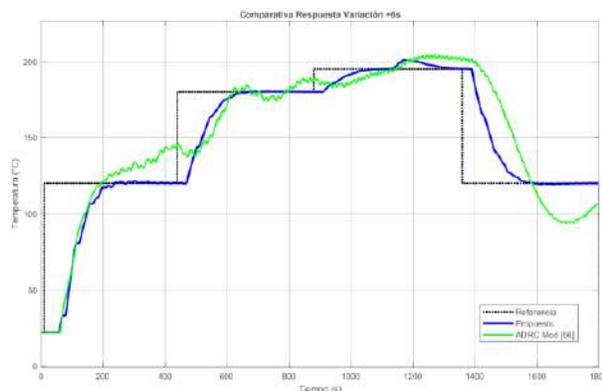


Fig. 1 Comparación Sistemas de Control con Error de Predicción en Tiempo Muerto



Arquitectura y Propiedades Magnéticas de Compuestos Híbridos Basados en Nanopartículas de Oro y Óxido de Hierro

Architecture and Magnetic Properties of Hybrid Composites Based on Gold and Iron Oxide Nanoparticles

Oscar Moscoso Londoño^{1, γ}, Jose Dario Agudelo¹, Sebastian Calderon² and Diego Muraca³

1 Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Manizales. Manizales, Colombia.

2 International Iberian Nanotechnology Laboratory. Braga, Portugal.

3 Instituto de Física 'Gleb Wataghin', Universidade Estadual de Campinas. Campinas-SP, Brasil.

γ. Autor correspondiente: oscar.moscosol@cautonoma.edu.co

Resumen

Nanomateriales híbridos basados en óxido de hierro y metales de transición son comúnmente sintetizados a través de una reacción de crecimiento por semillas [1]. A pesar de los reportes de varias rutas de síntesis, aún no están claros los protocolos de síntesis que sustentan la producción exitosa de nanopartículas híbridas. En este trabajo, proporcionamos de manera detallada los protocolos para generar estos materiales, enfocándonos en describir el papel desempeñado por diversos parámetros durante la síntesis. Un control preciso de los parámetros involucrados en la síntesis permite ajustar la morfología del nanosistema. Por ejemplo, empleando como semillas nanopartículas de Au de tamaño medio entre 2 y 4 nm, octadeceno como medio de reacción y un tiempo de 30 minutos para crecimiento del óxido de hierro, se alcanzan heteroestructuras con morfología tipo dímero. Al utilizar semillas de Au de ~6nm y manteniendo inalterados los anteriores parámetros de síntesis, se modifica la morfología del sistema, así se obtienen nanoheteroestructuras tipo flor. En un tercer protocolo de síntesis, se utilizaron las anteriores semillas de Au (~6 nm), la descomposición del complejo de Fe se llevó a cabo en un entorno de mayor polaridad en un tiempo de reacción de 60 minutos. Con este procedimiento, el objetivo fue aumentar los puntos de nucleación y el tiempo de reacción para el crecimiento del óxido de Fe, para luego obtener heteroestructuras de óxido de Au@Fe con morfología del *core@shell*.

Se registran hasta 6 palabras clave en singular. No desarrollar acrónimos en las palabras clave.

Palabras clave: nanocompuesto, crecimiento por semillas, nanomateriales híbridos, nanopartícula.

Abstract

Metal-iron oxide hybrid nanomaterials are typically constructed using the seeded-growth reaction sequence. Despite the reports of several synthesis routes, there are not yet clear the synthesis protocols that underpin a successful hybrid nanoparticle creation [1]. In this work, we provide in a detailed way the protocols for generating these materials, focusing on describing the role played by diverse synthesis parameters. An accurate control of the most relevant synthesis aspects allows tuning the morphology of the final product, e.g., employing Au nanoparticles of mean size between 2 and 4 nm as seeds, octadecene as reaction environment and a reaction time for the iron oxide growth of 30 minutes are reached dimer-like heterostructures. By using Au seeds of ~6nm and keep unaltered the previous synthesis parameters, the morphology of the system is modified, this time a flower-like heterostructure was obtained. For the third synthesis protocol, we decide to use the previous Au seeds, carried out the chemical reaction in an environment of increased polarity



and a reaction time to 60 minutes. With this procedure, the target was to increase the nucleation points and the reaction time for the Fe-oxide growth, to then obtain heterostructures of Au@Fe-oxide with core@shell morphology.

Keywords: nanocomposite, seeded-growth reaction, hybrid nanomaterial, nanoparticle.

Referencias

[1] P. Tancredi, O. Moscoso Londoño, P. C. Rivas Rojas, U. Wolff, L. Socolovsky, M. Knobel, D. Muraca. Strategies to tailor the architecture of dual Ag/Fe-oxide nano-heterocrystals-Interfacial and morphology effects on the magnetic behavior. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 51, 295303, 2018



Diseño de Intercambiadores de Calor de Coraza y Tubo por Medio de Optimización de un Modelo Termo-Económico Riguroso

Rigorous Thermo-Economic Model Optimization for Shell-&-Tube Heat Exchanger Design

Luis Perdomo-Hurtado^γ, Juan Sebastián Rincón Tabares

Mechanical and Production Department, Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, Colombia

γ. Autor correspondiente: lperdomo@autonoma.edu.co

Resumen

Los intercambiadores de calor de coraza y tubo (STHX) son uno de los equipos para intercambio energético más usados en diversos procesos industriales. En estos intercambiadores de calor, los métodos de diseño y selección han evolucionado desde simples reglas de construcción hasta pasar por rigurosos métodos de optimización multi-objetivo. En estos últimos, diferentes conjuntos de funciones se han estudiado, en donde aspectos termodinámicos, económicos e hidráulicos se combinan para encontrar configuraciones de diseño óptimas para aplicaciones específicas. Las configuraciones reportadas muestran que, a pesar de encontrar óptimos, estas no son manufacturables o irreales para propósitos industriales. La industria requiere intercambiadores de calor estandarizados (TEMA, ASME o PED) o de fácil manufactura en aras de reducir la relación costo-peso al igual que sea energéticamente eficiente. En este trabajo, se propone un modelo de optimización que combine ambos factores; por un lado, la exergía transferida y la generación de entropía constituyen la parte energética del modelo y su parte económica está conformada por un modelo de estimación de costo-peso que discrimina entre configuraciones estandarizadas en el TEMA o la elaboración del intercambiador a partir de las operaciones de manufactura del mismo. Por medio de un algoritmo genético acoplado a recocido simulado se exploraron las configuraciones óptimas para dos sistemas reportados por la industria. Para un sistema aceite de higuera – agua se encontró un intercambiador de coraza y tubo con un valor de alrededor de 3500 USD menos al reportado en la compra industrial. Por último, para un sistema agua – agua se encontró que se requería manufacturar el intercambiador y la construcción de este es alrededor de 12000 USD menor al adquirido y reportado.

Palabras clave: Intercambiador de calor de coraza y tubo, optimización, análisis exergo-económico, TEMA

Abstract

Shell-&-Tube Heat Exchangers (STHX) are one of the most important devices for energy exchange in a wide range of industrial process. For this kind of heat exchangers, design and selection methods have been evolving from simple design rules to rigorous multi objective optimizations. Different sets of objective functions related with thermodynamic, economic or hydraulic aspects of STHX can be found in literature where most of them showed unreal optimum configurations for industrial purposes. Industry requires solutions of weight reduction and energy efficiency for their heat exchangers, as well as, reachable standard configurations (TEMA, ASME or PED) or easy



manufacture. In this work, we propose a coupled model between energy efficiency and cost-weight reduction mapped in TEMA standards and allowable real manufacturable operations. Energy efficiency model uses the transferred exergy and entropy production concepts that take into account from thermal to hydraulic aspects. By other hand, the economic model estimates the total capital cost based on a rigorous selection that discerns between a TEMA existent STHX and the lowest cost-weight heat exchanger (calculating its costless manufacturing operations). A genetic algorithm coupled with simulated annealing restricted to a material HX construction material database has been used in order to obtain the problem global optimum. STHX for castor oil – hot water and water - water systems were studied at real industrial conditions and requirements. The STHX for the castor oil – water system requires a standard manufactured STHX which cost is around 3500 USD less than the reported and the water-water STHX requires a non-standard dimensions HX which have to be manufactured. This STHX is around 12000 USD less than the reported one.

Keywords: Shell-&-Tube Heat Exchangers, optimization, exergy-economic analysis, TEMA



Caracterización Experimental de la Aerodinámica del Rotor de un Cuadricóptero en *Hover*.

Aerodynamic Characterization of a Quadcopters Rotor in Hover.

Juan S. Villegas ¹. Omar D. López ¹, Jaime Escobar ²

1. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes. Bogotá, 1117711

2. ADVECTOR, Chía, Colombia, 250001

Autor corresponsal: od.lopez20@uniandes.edu.co

Resumen

En este trabajo se muestra y discute el diseño e implementación de un protocolo de pruebas que permite evaluar las características aerodinámicas del rotor de un cuadricóptero en un banco de pruebas. La motivación del desarrollo de este proyecto parte de la necesidad de validar experimentalmente de una forma sencilla, controlada y guiada los diversos modelos computacionales que se han desarrollado para predecir el comportamiento de sistemas de propulsión rotodinámicos de pequeña escala típicamente usados en vehículos multicópteros. Como objeto de estudio se utilizó un rotor comercial ampliamente usado en cuadricópteros de propósito general. Este tipo de rotores son empleados por la empresa colombiana ADVECTOR® en el cuadricóptero Araknos v2. (Figura 1). El motor del rotor tiene un diámetro de 50mm con una masa de 80gr, su velocidad de rotación máxima sin carga es de 11990 RPM. La hélice, por otra parte (Figura 2), está fabricada en fibra de carbono tiene un diámetro de 36cm con una cuerda de 20.77 mm en la raíz, 4.33mm en la punta y a un 75% de la envergadura la cuerda es de 25.3mm.



Figura 1: Araknos v2.



Figura 2: Hélice del Araknos v2.

El montaje experimental consta de un soporte de aproximadamente 1.6 m de altura (para aislar el efecto suelo), en el cual se coloca el sistema motor-rotor y su respectiva instrumentación. La balanza de medición de empuje y torque es comercial marca RCbenchmark serie 1580, la cual consta de celdas de carga para la medición de dichas variables. La velocidad angular se mide por medio de dos métodos: 1) un sensor óptico marca OMRON y 2) la señal PWM del motor. En la Figura 3 se observa una foto del montaje.

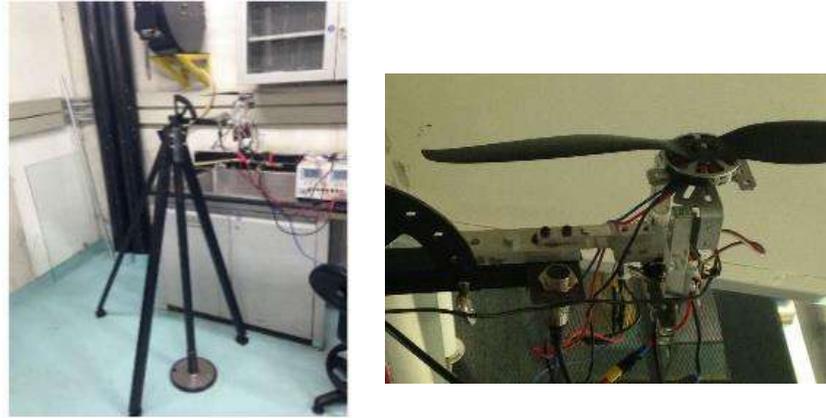


Figura 3. Montaje

La figura 4 muestra que usando como método de medición la señal PWM a altas velocidades angulares el valor de la figura de mérito encontrado es 0.53, mientras que para la señal óptica la figura de mérito tiende a un valor de 0.60. La magnitud típica para la figura de mérito en rotores grandes esta entre 0.6 y 0.75, se considera que el resultado obtenido en el presente estudio es aceptable dado la influencia del número de Reynolds. En el caso de la eficiencia global del sistema rotor-motor (ver Figura 5) se observa que los resultados obtenidos son bastante similares para ambos métodos de medición de la velocidad angular. La señal PWM sugiere una eficiencia un poco más alta del sistema a altas RPM; mientras que, para la señal óptica, al ser una medición directa de la velocidad angular, presenta un valor un poco más razonable del 80%.

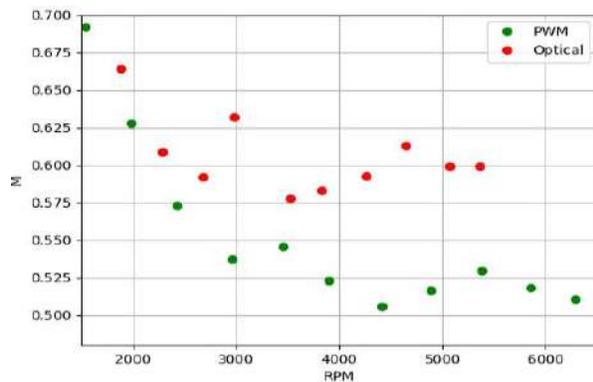


Figura 4: Figura de Mérito.

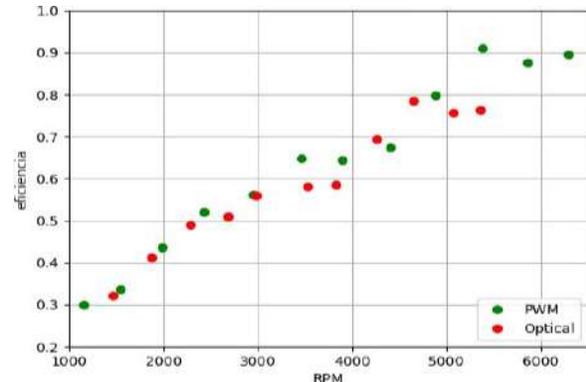


Figura 5: Eficiencia global.

Palabras clave: Cuadricópteros, rotor, eficiencia aerodinámica, Figura de Mérito.

Abstract

In the present work the design and implementation of a protocol for testing small rotors for quadcopters in a test bench is shown and discussed. The primary motivation for this research work is to validate several computational models that have been already implemented for the estimation of the aerodynamic performance of small rotors. The object of study is a commercial rotor commonly used in general purpose quadcopters. These rotors are used by the Colombian company ADVECTOR in the quadcopter Araknos v2 (Figure 1). The electric motor has a diameter of 50mm



with a mass of 80gr with a maximum angular velocity of 11900 RPM unloaded. The rotor is made of carbon fiber and has a diameter of 36cm with a root chord of 20.77 mm, a tip chord of 4.33 mm and a chord of 25.3 mm at 75% of its span (See figure 2).



Figure 1: Araknos v2.



Figure 2: Araknos v2 rotor.

The experimental set-up consists of a frame of approximately 1.6 m in height (to reduce ground-effects), in which the instrumentation and the rotor are mounted. The aerodynamic balance used to measure thrust and torque is a RCbenchmark series 1580 with load cells to measure the desired variables. The angular velocity is measured by two different methods: 1) an OMRON optic sensor and 2) with the PWM signal of the electric motor. Figure 3 shows a picture with details of the experimental set-up.

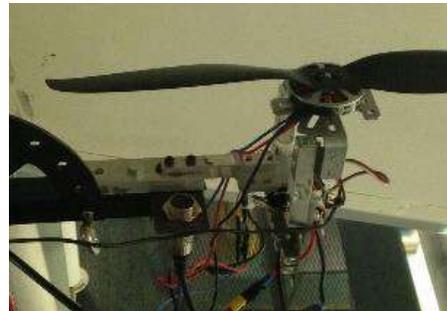


Figure 3. Experimental Set-up

Figure 4 shows the experimental results for the figure of merit in which it is observed that for the case of the PWM signal the value at high angular velocity is lower (0.53) than the predicted by the optical sensor (0.60). Typically, the figure of merit for large rotors is on the order of 0.6 to 0.75 but given the influence of the Reynolds number these results are considered acceptable. Figure 5 shows the results for the global efficiency of the rotor-motor system. It is clear that both angular velocity measurement methods arrive to similar results. Nevertheless, at high angular velocities the PWM achieved a higher value of the global efficiency than the one measure with the optical sensor which is in the order of 80%.

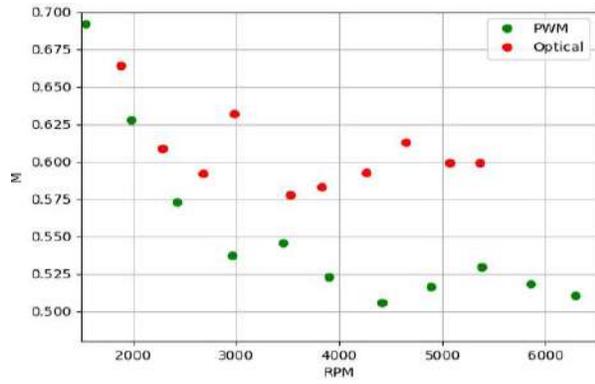


Figure 4: Figure of Merit.

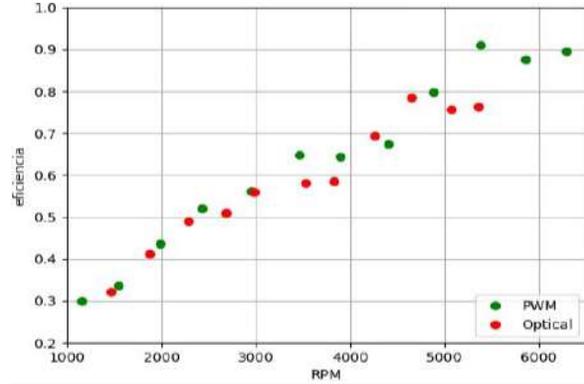


Figure 5: Global efficiency.

Keywords: Quadcopters, rotor, aerodynamic performances, Figure of Merit.



Evaluación del Desempeño Energético de Sistemas Solares Fotovoltaicos Instalados en el Departamento de Caldas

Evaluation of the Energy Performance of Photovoltaic Solar Systems Installed in the Department of Caldas

Luisa Fernanda Echeverry-Cardona^{1, γ}, Francy Nelly Jiménez-García¹, Alejandra María Restrepo-Franco¹, Gerardo Andrés García-Gutiérrez², Olga Lucia Ocampo-López¹, Luis Fernando Mulcúe-Nieto¹.

1. Departamento de Física y Matemática, Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, Colombia.
2. Centro de Automatización Industrial, Sena Regional Caldas, Manizales, Colombia.
γ. Autor corresponsal: luisa.echeverryc@autonoma.edu.co

Resumen

En Colombia se viene trabajando desde el 2001 en la implementación y utilización de energías renovables (ER) desde el planteamiento de la Ley 697/01 sobre uso racional de energía; la cual define como propósito nacional avanzar hacia la utilización de fuentes renovables en pequeña escala y a apoyar la investigación básica y aplicada para reducir costos y ampliar la capacidad de instalación de ER. Una de estas ER es la energía solar fotovoltaica la cual presenta un alto potencial en Colombia, ya que la radiación media en el país, de 4,5 kWh/m² día, supera el promedio estimado mundial de 3,9 kWh/m² día; además está por encima de países pioneros en esta forma de energía como Alemania con una radiación promedio de 3,0 kWh/m² día.

Por lo anterior, se hace necesario desarrollar investigaciones en nuestro país que permitan potenciar el uso de los sistemas solares fotovoltaicos en nuestras condiciones climáticas particulares y bajo los parámetros de instalación de los sistemas bajo estudio. La presente investigación muestra el resultado del análisis del desempeño energético de tres sistemas solares fotovoltaicos instalados en el Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA regional Caldas.

Los sistemas solares analizados fueron un sistema solar fotovoltaico monocristalino conectado a la red, un sistema policristalino conectado a la red y un sistema solar fotovoltaico policristalino aislado. Se tomaron datos de las variables temperatura del panel, temperatura del inversor, radiación solar en el sitio de la medida, tensión y corriente a la entrada y salida del inversor y de las baterías. La toma de datos se realizó cada 10 minutos para cada una de las variables y el experimento se llevó a cabo durante 10 días seleccionados de manera aleatoria durante los meses de abril, mayo y agosto de 2018. Se tomaron datos estos meses para tener información de dos temporadas climáticas con diferencias marcadas en la región objeto de estudio.

Los parámetros de eficiencia del sistema monocristalino indican que su rendimiento oscila entre 11% y 18% aproximadamente, para un valor diario medio de 13,79%. Este valor es mayor al que tienen los módulos utilizados en condiciones estándar STC que es de 12.1 %. Así mismo, se pudo



observar que para temperaturas por encima de los 30 °C, en las celdas solares, los rendimientos son bajos debido a las pérdidas por temperatura. El rendimiento del inversor estuvo por encima del 95 % en la mayor parte del tiempo, presentando un valor promedio de 96,94 %. El YIELD diario fue en total 1,857 Wh/Wp, el cual representa el 77,37 % del Yield de referencia calculado de 2,40 Wh/Wp: este porcentaje indica el Performance Ratio (PR) del sistema. A horas finales del día se registraron valores bajos del PR, que obedecen a las pérdidas por efecto coseno, y a las bajas potencias a la entrada del inversor, lo cual repercute en forma dramática en su eficiencia. Finalmente se obtuvo que el sistema con módulos policristalinos presenta un mayor rendimiento global, con un PR de 89.5%, frente a 77.37% del monocristalino, diferencia atribuida principalmente a las pérdidas por temperatura.

Palabras clave: Energías solar, eficiencia, monocristalino, policristalino, aislado, conectado a la red.

Abstract

In Colombia, it has been working since 2001 on the implementation and use of renewable energies (RE) from the approach of Law 697/01 on the rational use of energy; which defines as a national purpose to move towards the use of small-scale renewable sources and to support basic and applied research to reduce costs and expand the ER installation capacity. One of these ERs is photovoltaic solar energy which has a high potential in Colombia, since the average radiation in the country, of 4.5 kWh / m²day, exceeds the world estimated average of 3.9 kWh / m²day; It is also above countries pioneers in this form of energy as Germany with an average radiation of 3.0 kWh / m²day.

Due to the above, it is necessary to develop research in our country which allows us to promote the use of photovoltaic solar systems in our climatic conditions, and under the installation parameters of the systems and under study. The present investigation shows the result of the analysis of the energy performance of three solar photovoltaic systems installed in El Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA regional Caldas.

The solar systems analyzed were a monocrystalline solar photovoltaic system connected to the grid, a polycrystalline system connected to the grid, and an isolated polycrystalline photovoltaic solar system. Data was taken from the variables panel temperature, inverter temperature, solar radiation at the measurement site, voltage and current at the input and output of the inverter and the batteries. The data collection was done every 10 minutes for each of the variables and the experiment was carried out for 10 days randomly selected during the months of April, May and August of 2018. Data was taken these months to have information of two climatic seasons with marked differences in the region under study.

The efficiency parameters of the monocrystalline system indicate that its performance ranges between 11% and 18% approximately, for an average daily value of 13.79%. This value is greater than that of the modules used in STC standard conditions, which is 12.1%. Likewise, it could be observed that for temperatures above 30 ° C, in the solar cells, the yields are low due to the losses by temperature. The investor's return was above 95% in most of the time, presenting an average value of 96.94%. The daily YIELD was 1,857 Wh/Wp in total, which represents 77.37% of the calculated reference Yield of 2.40 Wh / Wp: this percentage indicates the Performance Ratio (PR) of the system. At the end of the day, low PR values were recorded, due to losses due to the



cosine effect, and low power levels at the investor's entrance, which has a dramatic effect on efficiency. Finally, it was obtained that the system with polycrystalline modules presents a higher overall yield, with a PR of 89.5%, as against 77.37% of the monocrystalline, a difference attributed mainly to the losses by temperature.

Keywords: Solar energy, efficiency, monocrystalline, polycrystalline, off grid, on grid.



Flujo Cruzado en Torno a un Vehículo Tipo Hatchback

Cross Flow Around a Hatchback Light Passenger Vehicle

Lucie Mesquita^{1, γ}, Matheo López², Omar López^{2, γ} y Luis Muñoz²

1. *Grande école* of engineering, ENSTA ParisTech, Palaiseau, Francia

2. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

γ. Autor correspondiente: od.lopez20@uniandes.edu.co

Resumen

El estudio de la aerodinámica de vehículos terrestres ha tomado un gran interés en los últimos años debido al impacto que tiene la misma en el desempeño y eficiencia de dichos vehículos. Por supuesto, este interés en mejorar la eficiencia aerodinámica de vehículos terrestres va acompañado en la reducción de consumo de combustible y las emisiones. La dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) representa una alternativa para el análisis y estudio de la aerodinámica de vehículos terrestres que complementa a las pruebas de carretera y estudios a escala en túnel de viento. Típicamente el problema de flujo cruzado es analizado en vehículos de carga, trenes o buses [1]. Sin embargo, a medida que la infraestructura vial mejora y las velocidades de los vehículos en carretera aumenta, el problema del flujo cruzado en vehículos livianos también comienza a ser de interés.

En el presente trabajo se implementó un modelo de CFD de un vehículo terrestre tipo Hatchback. Para la obtención de modelo geométrico, se digitalizó un vehículo en su escala real con ayuda de un escáner marca Artec Eva. A partir de este modelo se construyó el dominio computacional suficientemente grande para reducir el bloqueo de la estela y simular el flujo libre inicialmente con una incidencia frontal (sin flujo cruzado) a una velocidad de 50 km/h. Se generó una familia de mallas con ayuda del software Ansys – ICEM que varían desde 1 hasta 13 millones de elementos con el fin de realizar un análisis de convergencia. Las simulaciones se desarrollaron en el software comercial Ansys-Fluent v17 asumiendo un flujo incompresible y estacionario. Los resultados numéricos fueron validados con una prueba simple de desaceleración (coast-down test) basada en la práctica recomendada SAE J1263 mostrando resultados similares [2]. La figura 1 muestra los resultados del análisis de convergencia para dos modelos: uno en el cual la parte inferior del vehículo era plana mientras que en la otra incluía algunos detalles de la parte inferior del vehículo. La figura 2 muestra resultados de la visualización de las líneas de corriente (vista superior) para el caso del vehículo con parte inferior plana, se observa claramente la formación de un par de vórtices contra-rotatorios en la estela del vehículo.

Partiendo de las mallas generadas para el caso sin flujo cruzado se realizaron una serie de refinamientos localizados para poder mejorar la captura de los fenómenos esperados en el caso del flujo cruzado. Se generaron 4 mallas con 7 a 16 millones de elementos para simular el caso de flujo cruzado. El estudio numérico se hizo para pequeñas velocidades de flujo lateral no superiores al 10% de la velocidad del vehículo. Los resultados numéricos muestran un aumento significativo en las fuerzas (lateral, arrastre y sustentación) que experimenta en vehículo respecto a la condición



sin flujo cruzado (Ver figura 3). También se observan cambios radicales en la dinámica del flujo, distribución de presión y desprendimiento del flujo.

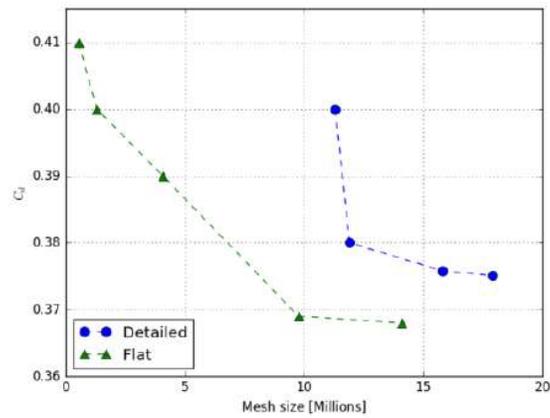


Figura 1. Resultados convergencia de malla para caso sin flujo cruzado

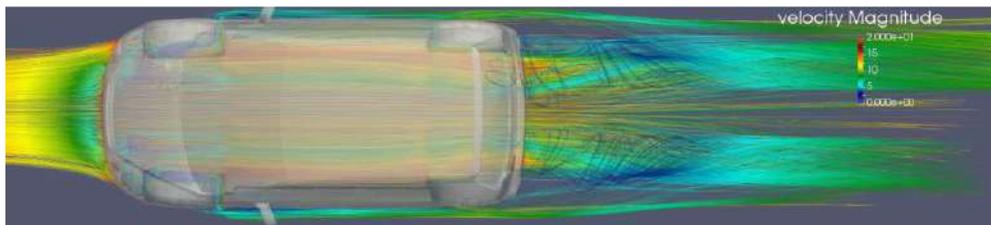


Figura 2. Líneas de corriente para caso sin flujo cruzado

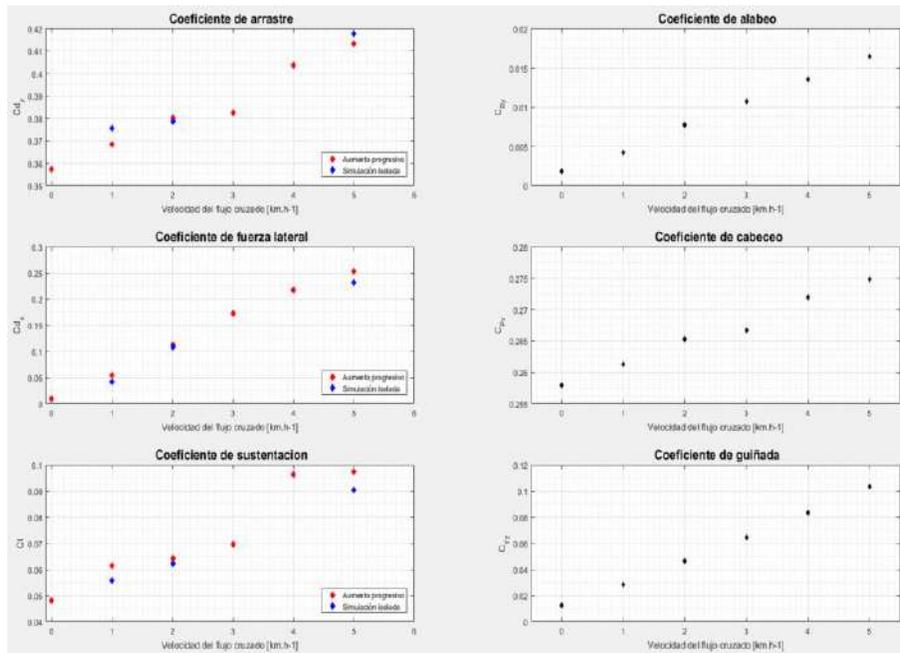


Figura 3. Desempeño aerodinámico del vehículo en el caso de flujo cruzado.



Palabras clave: Flujo cruzado, vehículos ligeros, Dinámica de fluidos computacional, desempeño aerodinámico.

Abstract

The interest in the aerodynamics of ground vehicles has greatly increased in recent years due to the impact that it has in the performance and efficiency of these vehicles. An improve in the aerodynamic performance of ground vehicles directly impacts fuel consumption and atmospheric emissions. Computational Fluid Dynamics (CFD) represents an alternative method to analyze and study the aerodynamic of ground vehicles that complements road and wind tunnel tests. Typically, the study of cross flow in ground vehicles is associated to heavy vehicles, trains and buses [1]. Nevertheless, as the road infrastructure improves and the average speed of light vehicles increases, the problem of cross-flow in these vehicles also becomes of interest.

In the present work, a CFD model of the flow around a light hatchback vehicle was implemented. In order to obtain an accurate geometrical model of a real vehicle, a small hatchback vehicle was scanned in 1:1 scale using an ARTEC EVA hand scanner. From this geometrical model, the computational domain was built with appropriated dimensions in order to reduce the wake blockage and to simulate free flow with a speed of 50 km/h (no cross-flow case). A family of meshes was generated with ANSYS-ICEM, the number of cells in these meshes ranged from 1 to 13 million. With this set of meshes a convergence analysis was performed. The simulations were performed with the commercial software ANSYS-FLUENT v17 assuming incompressible and stationary flow conditions. Numerical results were validated with a simple coast-down test based in the recommended practice SAE J1263 showing similar results [2]. Figure 1 shows the numerical results of the convergence analysis in which to different geometrical models were studied: one with a flat underfloor and another with several details of the underfloor of the vehicle. Figure 2 shows a visualization of the streamlines (top view) for the model with the flat underfloor. It is observed the formation of a pair of counter-rotating vortices in the near wake of the vehicle.

Starting from the family of meshes for the no cross-flow case, a series of localized mesh refinements were performed in order to capture the flow phenomena that will occur in the case of cross-flow. A new family of meshes ranging from 4 to 16 million of cells were generated in order to simulate the cross-flow case. The numerical study was performed for low side flow velocities (less that 10% of the free stream flow velocity). Numerical results show a significant increment in the forces (side, drag and lift) that the vehicle experience with respect to the no cross-flow case (See figure 3). It was also observed several important changes in the dynamics of the flow, pressure distribution and flow separation that explain the differences observed in the aerodynamic performance.

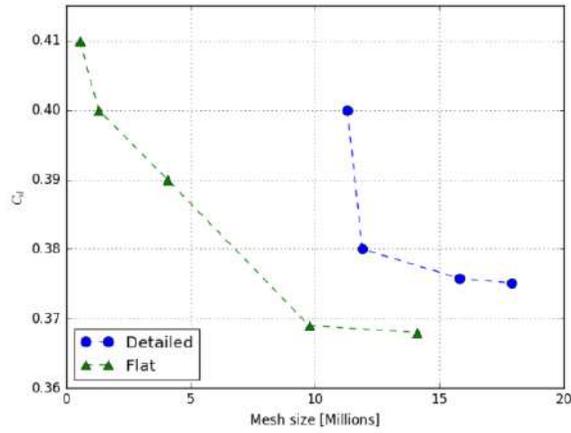


Figure 1. Convergence analysis results for the no cross-flow case.

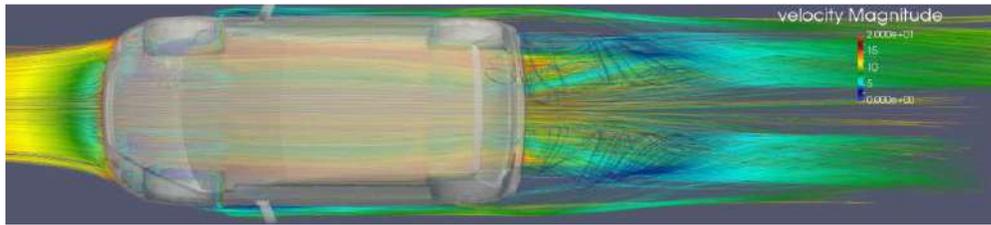


Figure 2. Streamlines visualization for the no cross-flow case.

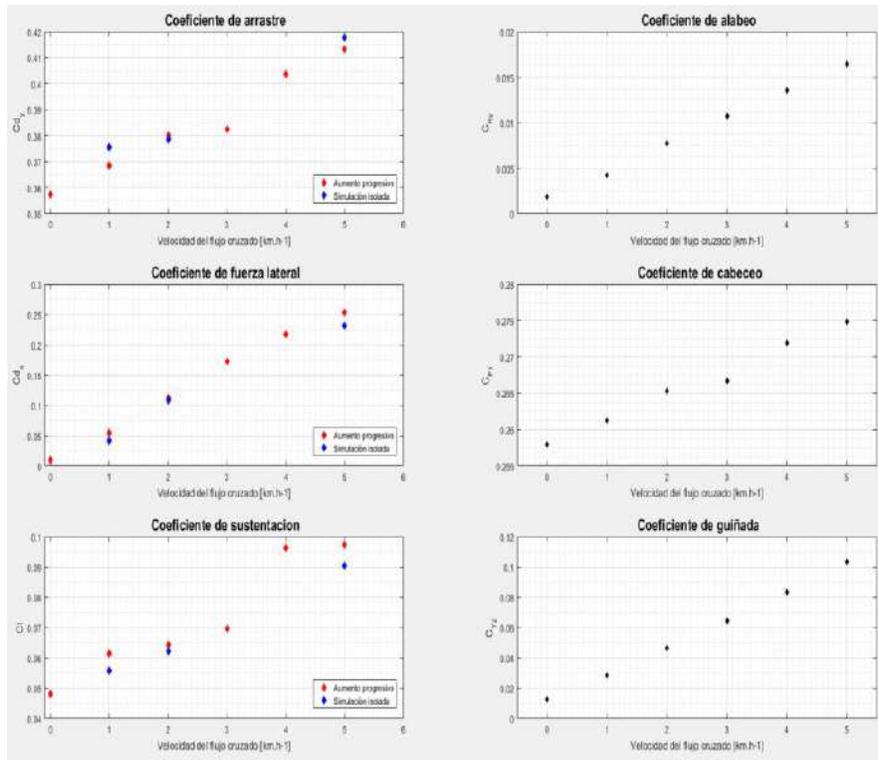


Figure 3. Aerodynamic performance of the hatchback vehicle for the cross-flow case.



Keywords: Cross Flow, light vehicles, Computational Fluid Dynamics, Aerodynamic performance.

Referencias

- [1] C. Baker, F. Cheli, A. Orellano, N. Paradot, C. Proppe, and D. Rocchi. “Cross-wind effects on road and rail vehicles”. *Vehicle System Dynamics*, 2009.
- [2] M. Lopez, O. Lopez, y L. Muñoz. “Influence of the underfloor geometry of a hatchback type ground vehicle in its drag coefficient”. *Third international conference in numerical and experimental aerodynamics of road vehicles and trains (Aerovehicles 3)*, Milano, Italy, 2018.



Estrategias de Eficiencia Energética en Vehículos Livianos del Transporte por Carretera en Colombia

Energy Efficiency Strategies for Light Duty Vehicles in Colombia

Juan C. Castillo^{1, γ}, Álvaro Restrepo¹, Juan Esteban Tibaquirá¹, Luis F. Quirama¹

1. Grupo de Investigación en Gestión Energética, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.

γ. Autor correspondiente: jccastillo@utp.edu.co

Resumen

El sector transporte por carretera en Colombia es el responsable del 44% del consumo de energéticos. Igualmente, se clasifica como el principal consumidor de los combustibles derivados del petróleo y el sector productivo con mayores pérdidas de energía. En este estudio, se presentan estrategias tecnológicas y operacionales que mejoran el rendimiento de los vehículos livianos. Además, se identifican metodologías encaminadas a la medición del consumo energético y emisiones de los vehículos y se evalúa la conducción eficiente como estrategia de eficiencia energética en Colombia. Como resultado, se implementó la metodología de pruebas basada en la Regulación CFR 40 de los Estados Unidos y COPANT en un laboratorio del país y se evaluó mediante el aseguramiento metrológico el consumo de combustible en un vehículo liviano de combustión interna. Adicionalmente, empleando conducción eficiente se identificó un aumento en el rendimiento del 15% y 20% en pruebas de laboratorio y ruta respectivamente.

Palabras clave: eficiencia, metodología, energéticos, rendimiento, consumo.

Abstract

In Colombia, road transportation consumes 44% of the overall energy available. This sector is considered a great consumer of oil-based-fuels and the least efficient productive sector. There was identified that technological and operational strategies like eco-driving enhance the performance of vehicles. There was implemented a set of methodologies based on the measurement of energy consumption and emissions of vehicles, which theoretical and experimental models have been performed. Besides, there was conducted the evaluation of eco-driving as an energy efficiency strategy for Light Duty Vehicles in Colombia by conducting tests in a chassis dynamometer, based on the procedures described by the CFR 40 of the United States of America and COPANT. In addition, there was conducted the measuring of fuel consumption of a Light Duty Vehicle and was identified the potential of ecodriving, due to there was achieved an increase up to 20% in the energy performance of the vehicle.

Keywords: efficiency, methodology, energetics, performance, consumption.



Estudio de Superficie Libre en la Descarga de una Compuerta Radial Mediante Técnica de CFD.

Study of Free Surface in the Discharge of a Radial Gate by CFD Technique.

María Camila Mesa Rodríguez¹, Kevin Alexander Henao González¹, Justin Román Ardila¹, Franklin Giovani Bastidas Cuya^{1,γ}, Julio Alberto Casas Monroy¹, Diego Andrés Hincapié Zuluaga¹.

1. Instituto Tecnológico Metropolitano, Ingeniería Mecatrónica, MATyER CADD
γ. Autor corresponsal: franklinbastidas220172@correo.itm.edu.co

Resumen

Colombia es un país reconocido por su amplia oferta hídrica la cual se percibe en la red superficial de aguas que cubre al país. Este recurso debe ser controlado para la disminución de pérdidas y el aumento de beneficios que se pueden obtener a partir de darle un aprovechamiento máximo que vaya más allá de intereses sectoriales.

Los reservorios de agua son utilizados para diversos fines como proyectos de irrigación, sistemas de drenaje, generación de energía eléctrica o para la mitigación de los efectos que causan las inundaciones ya que se hace evidente que los desbordamientos y las crecidas de corriente perjudican altamente a las comunidades ocasionando pérdidas de vidas humanas y animales y/o pérdidas de bienes económicos y naturales.

Frente a las adversidades que ocasionan las inundaciones se deben tomar medidas de control en los vertimientos mediante compuertas que son dispositivos que simulan un obstáculo hidráulico en los canales o las descargas de los reservorios y estas permiten que el agua fluya por debajo de una manera controlada, ya sea con una apertura parcial o total de la compuerta.

El objetivo general de este estudio fue hacer un modelo 2D de un depósito de agua en el que el fluido se transporta por un conducto, luego pasa bajo la apertura parcial de una compuerta radial y finalmente se analiza la superficie libre del flujo de descarga, para esto se desarrolló un modelo numérico CFD (Dinámica de Fluidos Computacional).

La metodología consistió en primer lugar en el diseño de la geometría en el módulo DesignModeler de ANSYS 19.1, a continuación se dividió la geometría en celdas generando una malla de elementos finitos en el que se hizo un refinamiento en la salida de la compuerta, luego se procedió a la simulación numérica y a hacer un análisis hidrodinámico del flujo de la superficie libre a la salida de la compuerta radial aguas abajo teniendo en cuenta diferentes condiciones iniciales en ANSYS Fluent.

Finalmente, se contrastaron de manera satisfactoria los resultados obtenidos por un método de elementos naturales (NEM) que no requiere mallado y la técnica de CFD para el análisis del flujo de aguas abajo en un sistema de control de vertimiento, se analizaron dos casos, el primero para el flujo en una compuerta hidráulica y la generación de su superficie libre y el segundo, cuando el flujo de agua es expulsado al aire para su disipación de energía. Los resultados obtenidos se muestran en diferentes campos y mapas de velocidad y fase, y estos estuvieron dentro de un margen de error de un 10%.



Palabras clave: Compuertas, superficie libre, dinámica de fluidos computacional (CFD), Método de elementos naturales (NEM), Fluent.

Abstract

Colombia is a country recognized for its wide water supply which is perceived in the surface water network that covers the country. This natural resource should be controlled so that Colombia can both increase the benefits and reduce the losses of fresh water. By controlling these resources Colombia can take advantage and maximize the resource beyond the sectoral interests.

The water reservoirs are used for various purposes, such as; irrigation projects, drainage systems, electric energy generation, and to mitigate the effects caused by floods. Without this control that the reservoir provides overflows and flooding are evident and severely harm the communities causing loss of both human and animal life, and destroy the economy and its natural goods

Faced with the adversities caused by flooding, control measures must be taken in the discharge through gates that are devices that simulate a hydraulic obstacle in the channels or the discharges of the reservoirs and these allow the water to flow below in a controlled manner, either with a partial or total opening of the gate.

The general objective of this study was to make a 2D model of a water tank in which the fluid is transported through a duct, then passes under the partial opening of a radial gate and finally the free surface of the discharge flow is analyzed, this was developed a numerical model CFD (Computational Fluid Dynamics).

The methodology consisted in the first place in the design of the geometry in the DesignModeler module of ANSYS 19.1, then the geometry was divided into cells generating a mesh of finite elements in which a refinement was made in the output of the gate, then proceeded to the numerical simulation and to make a hydrodynamic analysis of the flow of the free surface at the outlet of the downstream radial gate taking into account different initial conditions in ANSYS Fluent.

Finally, results obtained were contrasted satisfactorily by natural elements method (NEM) which it is not necessarily meshing and the CFD technique to the water flow analysis under a shedding control system. Two cases were analyzed. The first one was the flow in a hydraulic floodgate, and the generation of its free surface. The second one, when the water flow is expelled into the air to its energy dissipation. The results obtained are shown in different fields, speed maps, and phases. The error range that was found was 10%.

Keywords: Floodgates, free surface, Computational Fluid Dynamics technique (CFD), natural elements method (NEM), Fluent.



Validación CFD de una Nueva Metodología de Diseño para Turbina de Flujo Cruzado.

Validation CFD of a New Design Methodology for Cross-Flow Turbine.

Steven Galvis Holguin¹, Jorge Andrés Sierra Del Rio¹, Daniel Sanín Villa¹.

1. Ingeniería Mecatrónica, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia.

Steven Galvis Holguin

Resumen

Las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH's) se utilizan principalmente en las zonas no interconectadas (ZNI) del país donde la densidad poblacional es baja y el consumo de energía está confinado a pequeña escala, por lo que la provisión de energía eléctrica desde los sistemas interconectados no resulta factible. Por lo tanto, las ZNI donde se tienen disponibilidad de recursos hídricos, son los principales puntos de aplicación de las turbinas de flujo cruzado (TFC). Muchos sistemas de PCH's emplean las TFC tipo Michell-Banki debido a su simplicidad de diseño, bajo costo de fabricación y amplio rango de implementación en las PCH's por funcionar con un intervalo de altura de caída o cabeza de 1m – 200m, sin embargo comparado con diseños más avanzados y eficientes como turbinas Pelton y Francis, tienden a presentar eficiencias más bajas [1], esto puede deberse a que no hay metodologías de diseño que contengan las nuevas ecuaciones constatadas en la literatura para el dimensionamiento de cada una de las partes de la turbina Michell-Banki, basadas en las condiciones de sitio que se tengan.

El objetivo de este estudio es realizar una metodología de diseño detallada de cada uno de los elementos de la TFC tipo Michell-Banki, la cual se validará con la dinámica de fluidos computacional (CFD). En este estudio se realizó una investigación rigurosa de la literatura de las TFC, donde se determinaron los parámetros y ecuaciones más influyentes de diseño en la eficiencia máxima de la turbina Michell-Banki [2][3]. Posteriormente, se realiza el diseño de una TFC con los mejores parámetros geométricos encontrados en la literatura y mediante técnicas CFD, se valida la metodología de diseño empleando simulaciones transitorias con un tiempo de simulación de 1 segundo y un time step de 0,001 segundos considerando el modelo bifásico homogéneo compuesto por agua y aire a 25 °C, debido a que este tiene menos costo computacional que el no homogéneo. En resumen, en la figura 1 se puede observar el contorno de fracción volumétrica en el plano de simetría producido por el flujo del fluido, cuando viaja a través de la turbina desde la entrada hasta la salida, además se evidencia el flujo cruzado, el cual caracteriza a este tipo de turbinas. Se concluye que la metodología que se utilizó para el diseño de la TFC puede alcanzar eficiencias del 89%, lo cual es satisfactorio para solucionar la escasez de métodos de diseños completos para el dimensionamiento de los diferentes componentes de las TFC tipo Michell-Banki (Inyector, rotor y carcasa) según las condiciones de sitio que se tenga en el lugar de instalación.

Palabras clave: turbo-máquina, pico-hidroeléctrica, eficiencia, dinámica de fluidos computacional.



Abstract

The Small Hydroelectric Power Plants (SHPP's) are mainly used in the non-interconnected zones (ZNI) of the country where the population density is low and the energy consumption is confined on a small scale, so the provision of electrical energy from the interconnected systems without feasible result. Therefore, the ZNI where water resources are available, are the main points of application of the cross flow turbine (CFT). Many SHPP systems use the CFT type Michell-Banki due to its simplicity of design, low manufacturing cost and wide range of implementation in the SHPP's for operating at a fall height range or head of 1m - 200m, , however compared to more advanced and efficient designs such as Pelton and Francis turbines, tend to present lower efficiencies [1], this may be because there are no design methodologies that contain the new equations found in the literature for the sizing of each one of the parts of the Michell-Banki turbine, based on site conditions.

The objective of this study is to carry out a detailed design methodology for each of the elements of the CFT type Michell-Banki, which will be validated with the computational fluid dynamics (CFD). In this study, a rigorous investigation of the CFT literature was carried out, where the parameters and most influential design equations were determined in the maximum efficiency of the Michell-Banki turbine [2] [3]. Subsequently, the design of a CFT is performed, the design methodology is validated using transient simulations with a simulation time of 1 second and a time step of 0.001 seconds considering the homogeneous biphasic model composed of water and air at 25 ° C, because it has less computational cost than the inhomogeneous one. In summary, Figure 1 shows the contour of the volumetric fraction in the plane of symmetry produced by the flow of the fluid, when it travels through the turbine from the entrance to the exit, it also shows the cross flow, the which characterizes this type of turbines. It is concluded that the methodology that was used for the design of the CFT can reach the efficiencies of 89%, which is satisfactory for the treatment of the characteristics of the complete procedures of CFT type Michell-Banki (Nozzle, runner and housing) according to the conditions of the site that you have in the place of installation.

Keywords: turbo-machine, pick-hydroelectric, efficiency, computational fluid dynamic.

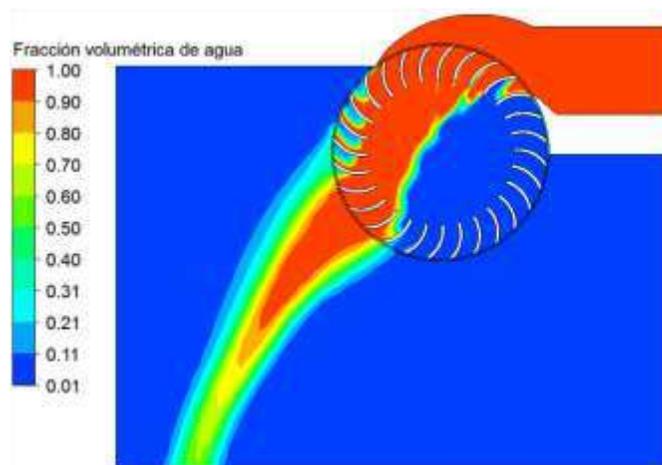


Figura 1. Fracción volumétrica de agua.



Referencias

- [1] A. Dragomirescu, “Numerical investigation of the flow in a modified Bánki turbine with nozzle foreseen with guide vanes,” *Proc. 2016 Int. Conf. Expo. Electr. Power Eng. EPE 2016*, no. Epe, pp. 874–879, 2016.
- [2] R. C. Adhikari and D. H. Wood, “A new nozzle design methodology for high efficiency crossflow hydro turbines,” *Energy Sustain. Dev.*, vol. 41, pp. 139–148, 2017.
- [3] R. Adhikari and D. Wood, “The Design of High Efficiency Crossflow Hydro Turbines: A Review and Extension,” *Energies*, vol. 11, no. 2, p. 267, 2018.



Estudio Computacional de los Rotores de un Cuadricoptero en Hover Utilizando el Metodo de Red de Vortices No-Estacionario

Computational Study of the Rotors of a Quadcopter Flying at Hover Using the Unsteady Vortex Lattice Method

Andres M. Pérez G.^{1,γ}, Omar López¹, Jaime Escobar²

1. Departamento de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

2. ADVECTOR. Investigación y Desarrollo, Chía, Colombia

γ. Autor correspondiente: am.perez259@uniandes.edu.co

Resumen

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV's), por sus siglas en inglés, se utilizan cada vez más aplicados en diferentes tareas en la industria. Existen diversos modelos de UAV's, dentro de los cuales el cuadricóptero resalta por sus capacidades de despegue y aterrizaje vertical (VTOL), alta maniobrabilidad y facilidad de operación [1].

La predicción del desempeño aerodinámico de los rotores es complicada debido a la complejidad del flujo desarrollado por estos [2]. En el caso de los cuadricópteros, las estelas desarrolladas por los rotores interactúan entre sí y con el fuselaje perjudicando el desempeño aerodinámico de los rotores y afectando la eficiencia de la aeronave.

Métodos analíticos, basados en parámetros empíricos para la estimación de los coeficientes aerodinámicos de los rotores, son aplicables al estudio de rotores de helicópteros con diseños sencillos, pero su empleo en el estudio de rotores pequeños usados en cuadricópteros puede llevar a errores considerables. Técnicas computacionales como CFD (Computational Fluid Dynamics) permiten estudiar el campo de flujo desarrollado por estos rotores, y calcular sus coeficientes aerodinámicos con mayor confiabilidad, pero su elevado costo computacional reduce su aplicación al estudio de un solo rotor.

Modelos computacionales como el método de red de vórtices no-estacionario (UVLM por su sigla en inglés) basados en flujo potencial y con bajos requerimientos computacionales, se ha aplicado al estudio de la aerodinámica de los rotores de un cuadricóptero. En el UVLM, la hélice se modela como una superficie discretizada en paneles que representan anillos de vorticidad, cada panel tiene un punto de control en donde se debe cumplir la condición de no penetración. Los lados de cada panel representan filamentos finitos de vorticidad los cuales inducen un campo de velocidad en todo el dominio computacional [4]. Los efectos de la viscosidad se incluyen en el método usando el modelo de crecimiento del núcleo de los vórtices de punta [3].

El presente trabajo muestra el estudio computacional de la aerodinámica de los rotores utilizados en el cuadricóptero ARAKNOS V2 de la compañía colombiana ADVECTOR. Los rotores tienen un diámetro de 360 mm y una cuerda de 25.31 mm al 75% de la envergadura [4]. A partir del modelo CAD del rotor; se halló su superficie media y fue discretizada en 231 paneles cuadrados.



A partir de las simulaciones se obtiene los coeficientes de empuje, la distribución del coeficiente de presión sobre las aspas y la estela generada por el rotor. Finalmente se realiza la simulación de los cuatro rotores del cuadricóptero operando simultáneamente, encontrando que el coeficiente de empuje es 7.14% menor que el desarrollado por un solo rotor. Los resultados de las simulaciones de los cuatro rotores fueron validados con datos experimentales obtenidos en pruebas de vuelo, las simulaciones con UVLM predice un empuje 9.44% más alto que el medido experimentalmente, esta diferencia puede deberse a la omisión del fuselaje en las simulaciones.

Referencias

- [1] E. P. Wigner, "Theory of traveling wave optical laser," *Physical Review*, vol.134, pp. A635-A646, Dec. 1965.
- [2] N. Osifchin and G. Vau, "Power considerations for the modernization of telecommunications in Central and Eastern European and former Soviet Union (CEE/FSU) countries," in *Second Int. Telecommunications Energy Special Conf.*, 1997, pp. 9-16
- [3] M. N. DeMers, *Fundamentals of Geographic Information Systems*, 3rd ed. New York: John Wiley, 2005.
- [4] T. J. van Weert and R. K. Munro, Eds., *Informatics and the Digital Society: Social, ethical and cognitive issues: IFIP TC3/WG3.1&3.2 Open Conference on Social, Ethical and Cognitive Issues of Informatics and ICT*, July 22-26, 2002, Dortmund, Germany. Boston: Kluwer Academic, 2003.
- [5] "A 'layman's' explanation of Ultra Narrow Band technology," Oct. 3, 2003. [Online]. Available: <http://www.vmsk.org/Layman.pdf>. [Accessed: Dec. 3, 2003].
- [6] H. Zhang, "Delay-insensitive networks," M.S. thesis, University of Waterloo, Waterloo, ON, Canada, 1997.
- [7] "AlphaCom Communications introduces VMSK technology," *The Business Journal Online*, May, 2000. [Online]. Available: <http://www.business-journal.com/LateMay00/Alpha.html>. [Accessed: May 2, 2000].

Palabras clave: Coeficiente de Presión, Coeficiente de Empuje, Coeficiente de Potencia, Núcleo del vórtice.

Abstract

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are widely used to perform different tasks in the industry. Different platforms to build UAVs are available, but the quadcopter is the most used due its Vertical Take-Off and Landing (VTOL) abilities, high maneuverability and easy operability [1].

Aerodynamic prediction of the performance of the rotors is complicated due to the complex flow developed by them [2]. The interaction between the wakes, and also with the fuselage harms the aerodynamic performance of the rotors and affects the global efficiency of the aircraft.

Analytical methods, based on empirical parameters to estimate the aerodynamic coefficients of the rotors, are used to study helicopter rotors of simple design, but its applicability to study small rotors used by quadcopters could lead to considerable errors. Numerical techniques such as Computational Fluid Dynamics (CFD) allows to study the flow field developed by small rotors, with high accuracy to calculate their aerodynamic coefficients, but its high computational cost reduces its applicability to study a single rotor.



Computational methods such as the Unsteady Vortex Lattice Method (UVLM), based on potential flow and with low computational requirements, have been used to study the aerodynamics of the rotors of a quadcopter. For the UVLM the propeller is modeled as surface discretized in panels, each panel represents a vorticity ring with a control point where the non-penetration boundary condition must be accomplished. The edges of the panels represent finite vorticity filaments which induce a velocity field over the computational domain. Viscosity effects are included to the method using the vortex core growth model for the tip vortices [3].

In the present work the computational study of the aerodynamics of the rotors, used by the quadcopter ARAKNOS V2 of the Colombian company ADVECTOR, is shown. The rotors are 360 mm diameter with a chord length of 25.31 mm at 75% of the span [4]. From the CAD model of the rotor, its medium surface is found and finally this surface is discretized by 231 quadrilateral panels.

From the simulations the thrust coefficient, pressure coefficient distribution on the blades and the wake generated by the rotor are obtained. Finally, a simulation of the quadcopter four rotors operating simultaneously, is performed, it was found that the trust coefficient is 7.14% lower than the one developed by the single rotor. Computational results are validated with experimental data from flight tests, the UVLM simulations predict a 9.44% higher thrust that the measured by the experiments, this difference could be due the omission of the fuselage in the simulations.

Keywords: Pressure coefficient, Thrust Coefficient, Power Coefficient, Vortex core.

References

- [1] E. P. Wigner, "Theory of traveling wave optical laser," *Physical Review*, vol.134, pp. A635-A646, Dec. 1965.
- [2] N. Osifchin and G. Vau, "Power considerations for the modernization of telecommunications in Central and Eastern European and former Soviet Union (CEE/FSU) countries," in *Second Int. Telecommunications Energy Special Conf.*, 1997, pp. 9-16
- [3] M. N. DeMers, *Fundamentals of Geographic Information Systems*, 3rd ed. New York: John Wiley, 2005.
- [4] T. J. van Weert and R. K. Munro, Eds., *Informatics and the Digital Society: Social, ethical and cognitive issues: IFIP TC3/WG3.1&3.2 Open Conference on Social, Ethical and Cognitive Issues of Informatics and ICT*, July 22-26, 2002, Dortmund, Germany. Boston: Kluwer Academic, 2003.
- [5] "A 'layman's' explanation of Ultra Narrow Band technology," Oct. 3, 2003. [Online]. Available: <http://www.vmsk.org/Layman.pdf>. [Accessed: Dec. 3, 2003].
- [6] H. Zhang, "Delay-insensitive networks," M.S. thesis, University of Waterloo, Waterloo, ON, Canada, 1997.
- [7] "AlphaCom Communications introduces VMSK technology," *The Business Journal Online*, May, 2000. [Online]. Available: <http://www.business-journal.com/LateMay00/Alpha.html>. [Accessed: May 2, 2000].



Estrategia para Disminuir la Incertidumbre en la Medida de Posición Global de un UGV

Strategy to Reduce Uncertainty in the Global Position Measurement for UGV

Geraldine Guisselle Fonseca De la Hoz¹, Alexander Martínez Álvarez^{1,γ}

1. Grupo de Automática y Robótica (GAR), Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia
γ. Autor corresponsal: amartin@javerianacali.edu.co

Resumen

En este trabajo se presenta una estrategia para mejorar la medición de posición de un robot móvil terrestre (UGV) con tracción diferencial, a partir de los datos de GPS y de otras variables como las velocidades de los motores y la orientación del robot, proporcionada por una brújula electrónica. Se realizó un análisis de las técnicas utilizadas actualmente para casos similares de navegación y control de un vehículo autónomo, notando que el Filtro de Kalman es uno de los algoritmos más utilizados para la estimación de datos con menor incertidumbre. Posterior a esto se utilizaron los datos proporcionados por el GPS y las mediciones de velocidad y orientación del robot para implementar la técnica de fusión sensorial que, en conjunto con la implementación de un Filtro de Kalman, condujo a una mejora en la precisión de los datos de posición global original, cuya incertidumbre era de aproximadamente ± 3 metros. Los resultados obtenidos con la fusión sensorial y el Filtro de Kalman demuestran una mejora en la medición superior al 50%, brindando así un mejor desempeño, frente al sistema de medición que utiliza solo el GPS.

Palabras clave: Fusión sensorial, Filtro de Kalman, Vehículos autónomos terrestres.

Abstract

This paper presents a strategy to improve the position measurement of an unmanned ground vehicle (UGV) with differential traction, based on GPS data and other variables such as motor speeds and robot orientation, provided by an electronic compass. An analysis was made of the techniques currently used for similar cases of navigation and control of an autonomous vehicle, noting that the Kalman filter is one of the most used algorithms for estimating data with less uncertainty. After this, the data provided by the GPS and the speed and orientation measurements of the robot were used to implement the sensory fusion technique which, in conjunction with the implementation of a Kalman filter, led to an improvement in the accuracy of the data of original global position, whose uncertainty was approximately ± 3 meters. The results obtained with the sensorial fusion and the Kalman filter show an improvement in the measurement over 50%, thus providing better performance, compared to the measurement system that uses only GPS.

Keywords: Sensor fusion, Kalman filter, Unmanned Ground Vehicles.

Planteamiento de la estrategia para mejorar la precisión de la medida de posición dada por el GPS



En la figura 1, se presenta el esquema que representa la estrategia utilizada para mejorar la precisión de los datos de posición dados por el GPS.

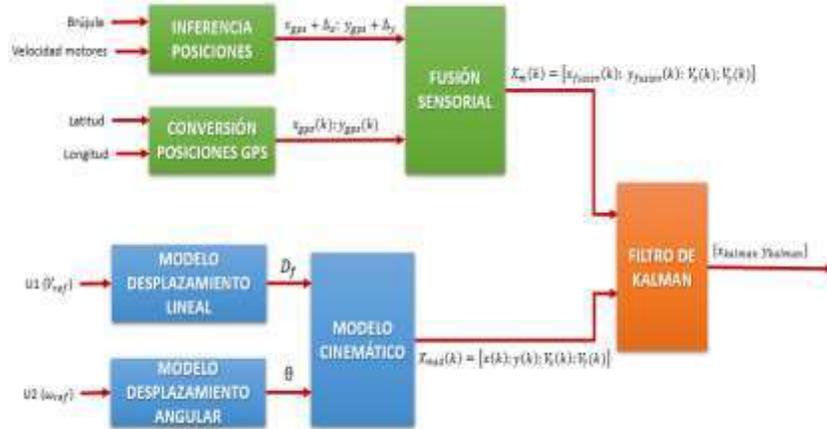


Figura 1. Esquema de la estrategia para mejorar la precisión de los datos de posición del vehículo autónomo dados por el GPS

Para validar el funcionamiento y respuesta de la estrategia de mejora de precisión de los datos del GPS utilizando filtro de Kalman y fusión sensorial, se diseñaron varias pruebas como la que aparece registrada en la figura 2. De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede establecer que los datos de posición dados por el Filtro de Kalman reducen la incertidumbre en la medición, ofreciendo un porcentaje de mejora del 52.37% para esta prueba, con respecto a la precisión original del sistema de medida basado solo en GPS.

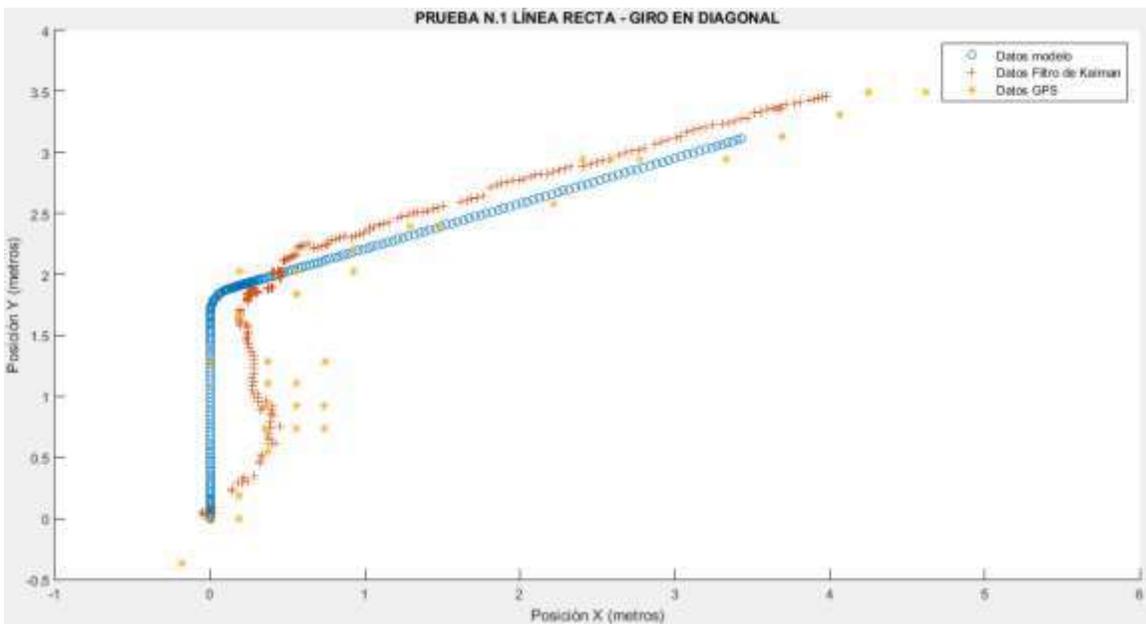


Figura 2. Trayectoria del robot en línea recta junto con giro en diagonal



Obtención de MMC Superficial en AA5052-H32 Empleando el Proceso FSP.

Superficial Metal Matrix Composite of AA5052-H32/Al₂O₃ Manufactured by Friction Stir Processing.

María Zuluaga Posada^{1, γ}, Elizabeth Hoyos Pulgarín², Yesid Montoya Góez³, Diana María López Ochoa²

1, 2. Escuela de Ingeniería y Ciencias básicas, Universidad EIA, Envigado, Colombia

3. Escuela de Ciencias de la Vida, Universidad EIA, Envigado, Colombia

3. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Medellín, Colombia

γ. Autor correspondiente: maria.zuluaga@eia.edu.co

Resumen

En este trabajo se empleó el proceso Friction Stir Processing (FSP) para obtener un material compuesto de matriz metálica (MMC por sus siglas en inglés) en la superficie de una lámina de Aluminio AA5052-H32, empleando partículas de alúmina fase gamma como material de refuerzo. El proceso FSP es una tecnología nacida del proceso FSW con la finalidad de modificar las propiedades superficiales de un material. A diferencia de los MMC fabricados por métodos convencionales y volumétricos, el FSP permite obtener materiales que, al ser modificados solo superficialmente mejoran las propiedades tribológicas de la pieza en regiones de interés. Estos materiales o piezas pueden ser sometidos a procesamiento posterior, es decir que el procesamiento superficial permite que características como la soldabilidad del material base se mantenga, a diferencia de algunos MMC obtenidos por fundición.

Para la fabricación de los MMC superficiales se emplearon dos herramientas, una para introducir las partículas en la superficie del material y otra herramienta para distribuir las en la región procesada. Se fijaron los parámetros de velocidad de giro, velocidad de avance y número de pasadas de inserción: 1000rpm, 100mm/min y 2 pasadas respectivamente. Se fabricaron tres grupos de muestras: sin partículas, con micropartículas de tamaño 5µm y con nanopartículas de tamaño 50nm, variando el número de pasadas de distribución para cada grupo. El valor teórico de la dureza del aluminio 5052-H32 es de 68 HV. Los resultados mostraron que el material procesado sin partículas presentó una disminución de dureza aproximada del 13% en los casos evaluados; mientras que el procesado con partículas de alúmina, tanto micro como nano, generó un incremento en la dureza superficial del material del 6 y el 24% respectivamente, con dos pasadas de distribución. Al incrementar a cuatro las pasadas de distribución, la dureza se redujo alcanzando valores cercanos al material base. Los resultados obtenidos indican que es posible modificar favorablemente las propiedades superficiales de un material empleando FSP.

Palabras clave: Compuesto de matriz metálica (MMC), Friction Stir Processing (FSP), aleación de aluminio, alúmina, dureza.



Abstract

In the present work Friction Stir Processing (FSP) was used to manufacture a metal matrix composite (MMC) on the surface of an aluminum alloy AA5052-H32, using gamma-phase alumina particles as reinforcement. FSP is a technology based on FSW process with the purpose of modify and enhance material properties. It allows to obtain materials modified only superficially, improving tribological properties only in regions of interest, unlike MMC made by conventional methods. These processed parts can be subjected to further processing, as an example surface processing allows characteristics such as the weldability of the base material to be maintained, unlike some MMC obtained by casting.

For the manufacture of MMC two tools were used. Tool 1 was used to introduce the particles in the base metal and Tool 2 was used to distribute the particles in the processed region. MMC beads were fabricated at 1000 rpm, 100 mm/min, and two insertion passes. Three groups of samples were obtained: processed without particles, with micro particles (5 μ m) and with nano particles (50nm). For each group the number of distribution passes varied. Base material hardness value was 68 HV. The results show that, the processed material without particles presented a decrease in hardness of 13%. Processed material with micro and nano particles, with two distribution passes, showed increased hardness values between 6 and 20% respectively. Increasing the distribution passes up to four, caused a hardness reduction to values close to the base material. The results indicate that it is possible to modify favorably the surface properties of a material using FSP.

Keywords: Metal Matrix Composite (MMC), Friction Stir Processing (FSP), aluminum alloy, alumina, hardness.

Referencias

- [1] H. G. Rana, V. J. Badheka, and A. Kumar, "Fabrication of Al7075 / B4C Surface Composite by Novel Friction Stir Processing (FSP) and Investigation on Wear Properties," *Procedia Technol.*, vol. 23, pp. 519–528, 2016.
- [2] M. S. Khorrami, S. Samadi, Z. Janghorban, and M. Movahedi, "Materials Science & Engineering A In-situ aluminum matrix composite produced by friction stir processing using FE particles," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 641, pp. 380–390, 2015.
- [3] V. Sharma, U. Prakash, and B. V. M. Kumar, "Surface composites by friction stir processing: A review," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 224, pp. 117–134, 2015.
- [4] M. W. Mahoney and S. P. Lynch, "Friction-Stir Processing," 2006.
- [5] R. S. Mishra and Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing," *Materials Science and Engineering R: Reports*, vol. 50, no. 1–2. Elsevier, pp. 1–78, 31-Aug-2005.
- [6] MatWeb, "Aluminum 5052-H32," MatWeb, 2018. [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=96d768abc51e4157a1b8f95856c49028&ckck=1>. [Accessed: 04-May-2018].



- [7] X. Cao, Q. Shi, D. Liu, Z. Feng, Q. Liu, and G. Chen, "Fabrication of in situ carbon fiber/aluminum composites via friction stir processing: Evaluation of microstructural, mechanical and tribological behaviors," *Compos. Part B Eng.*, vol. 139, pp. 97–105, Apr. 2018.
- [8] R. Moshwan, F. Yusof, M. A. Hassan, and S. M. Rahmat, "Effect of tool rotational speed on force generation , microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al – Mg – Cr – Mn (AA 5052-O) alloy," *Mater. Des.*, vol. 66, pp. 118–128, 2015.



Obtención de Juntas Disimiles de la Aleación de Aluminio AA7075 – T6 y Polietileno de Alta Densidad (HDPE) Empleando el Proceso *Friction Stir Welding* (FSW).

Dissimilar Joints of the Aluminum Alloy AA7075 – T6 and High-Density Polyethylene (HDPE) Obtained by Friction Stir Welding (FSW).

Santiago Escobar Muñoz^{1,2}, Elizabeth Hoyos Pulgarín¹.

1. Escuela de Ingeniería y Ciencias básicas, Universidad EIA, Envigado, Colombia
y. Autor corresponsal: santiago.escobar23@eia.edu.co

Resumen

En este trabajo se empleó el proceso de soldadura en estado sólido: Friction Stir Welding (FSW), aprovechando su condición para obtener uniones permanentes sin superar la temperatura de fusión de los materiales involucrados y sin requerir material de aporte. Sus características lo convierten en una buena opción para la obtención de juntas disimiles y específicamente para la combinación: AA 7075 – T6 y polietileno de alta densidad (HDPE por sus siglas en inglés). Esta aleación es comúnmente empleada en el sector aeroespacial y es ideal para el proceso FSW ya que se caracteriza por su baja soldabilidad por métodos tradicionales por fusión, al presentar problemas de susceptibilidad al agrietamiento durante la solidificación. Las uniones polímero - aluminio se presentan como una alternativa para la fabricación de componentes que requieren altas relaciones resistencia – peso.

Para las juntas se empleó material base de 50 x 150 mm y 3/16 in de espesor, una maquina CNC equipada con un dispositivo de medición de fuerzas, axiales y longitudinales, adaptado a la bancada; una herramienta no consumible de acero H13 con hombro convexo de círculos concéntricos, y un pin cilíndrico roscado de 4.5 mm de largo. Los parámetros evaluados estuvieron entre 500 y 2450 rpm de velocidad de giro y entre 25 y 100 mm/min para la velocidad de avance. Las juntas obtenidas se evaluaron empleando ensayos no destructivos (END) de inspección visual (IV) y líquidos penetrantes (LP). Adicionalmente se empleó corte por chorro de agua y partículas, buscando así el menor nivel de afectación, para obtener probetas y comparar el nivel de continuidad y/o unión en la sección transversal de las juntas, empleando estereoscopia óptica. Como complemento a las técnicas de inspección se contrastaron los resultados con datos de fuerza longitudinal y axial, y el comportamiento mecánico de algunas juntas.

A partir de los resultados obtenidos por los métodos mencionados se encontró que a valores intermedios de velocidades de rotación y de avance en el intervalo evaluado, la sección transversal de las soldaduras presenta mayor continuidad y mejores prestaciones. Resaltando la combinación de parámetros: soldaduras a 50 mm/min, entre 1150 a 2450 RPM, y la combinación de 75 mm/min y 2450 RPM. Obtención de juntas sanas es prometedora pero aun en desarrollo.

Palabras clave: *Friction Stir Welding*; Soldaduras disímiles; AA7075-T6; HDPE.



Abstract

In this work the solid-state process of Friction Stir Welding (FSW) was employed thanks to its ability to obtain permanent joints without surpassing the fusion temperatures of the base materials involved, free of filler material; making it a satisfactory process for bonding dissimilar materials, specifically the aluminum alloy AA7075 – T6 and high-density polyethylene (HDPE). This alloy is commonly used in the aerospace industry and other high – demanding mechanical applications because it's properties, making it ideal for FSW because it presents low weldability by traditional methods such as arc welding processes. Aluminum and polymer joints are presented as an alternative for the fabrication of components with high weight resistance ratio.

For the welds were used base material plates of 50X150mm and 3/16 in thick, a CNC machine equipped with a longitudinal and radial force measuring device and a non-consumable H13 tool with a concave shoulder and concentric circles, with a 4.5 mm threaded pin. Parameters selected range between 500 and 2450 RPM, and from 25 through 100 mm/min for the spindle and travel speed respectively. Non-destructive tests (NDT) of visual inspection and dye penetrant were used on the welds for evaluation the quality. Additionally, joints were sectioned and inspected using optical stereoscopy after obtaining probes by water jet cut, looking for the level of continuity in the region of welding. This information was compared with force data and destructive tests results.

Additionally water jet cutting was used, seeking for the lowest affectation level to obtain sound specimens and compare the level of continuity in the cross section of the joints, using optical stereoscopy. As a complement to the inspection techniques, the results were compared with longitudinal and axial force data and the mechanical behavior of some joints.

The cross section of the welds had greater continuity and better performance using the following parameters combinations: 50 mm/min and between 1150 to 2450 RPM, and the combination of 75 mm/min and 2450 RPM. Obtaining sound joints is promising but still in development.

Keywords: Friction Stir Welding; dissimilar welds; AA7075-T6; HDPE.

Referencias

- [1] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. Temple-smith, and C. J. Dawes, "Improvements relating to friction welding," WO 1993010935 A1, 1991.
- [2] A. R. Patel, C. G. Dalwadi, and H. G. Rana, "A Review: Dissimilar Material Joining of Metal to Polymer using Friction Stir Welding (FSW)," *IJSTE -International J. Sci. Technol. Eng.*, vol. 2, no. 10, pp. 702–706, 2016.
- [3] K. Martinsen, S. J. Hu, and B. E. Carlson, "Joining of dissimilar materials," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 64, no. 2, pp. 679–699, 2015.
- [4] F. Khodabakhshi *et al.*, "Microstructure-property characterization of a friction-stir welded joint between AA5059 aluminum alloy and high density polyethylene," *Mater. Charact.*, vol. 98, no. July 2016, pp. 73–82, 2014.
- [5] MakeItFrom, "7075-T6 Aluminum," 2018. [Online]. Available: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/7075-T6-Aluminum>. [Accessed: 02-Feb-



- 2018].
- [6] D. Fu, C. Sun, C. Zhang, and J. Liu, "Improvement of Formation Quality for Friction Stir Welded Joints," *Weld. J.*, vol. 91, no. Welding research, pp. 169–173, 2012.
 - [7] B. plastic Federation, "Polyethylene (High Density) HDPE," *British Plastic Federation*, 2018. .
 - [8] A. Plastics, "High-density polyethylene," 2018. .
 - [9] MatWeb, "Aluminum 7075-T6; 7075-T651," 2018. [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=4f19a42be94546b686bbf43f79c51b7d&ckck=1>. [Accessed: 02-Feb-2018].
 - [10] U. de Barcelona, "Polietileno de alta densidad," *Materials*, 2018. [Online]. Available: <http://www.ub.edu/cmematerials/es/content/polietileno-de-alta-densidad>.
 - [11] E. Azarsa and A. Mostafapour, "Experimental investigation on flexural behavior of friction stir welded high density polyethylene sheets," *J. Manuf. Process.*, vol. 16, no. 1, pp. 149–155, 2014.
 - [12] F. Simões and D. M. Rodrigues, "Material flow and thermo-mechanical conditions during Friction Stir Welding of polymers: Literature review, experimental results and empirical analysis," *Mater. Des.*, vol. 59, pp. 344–351, 2014.
 - [13] W. Ratanathavorn, "Hybrid Joining of Aluminum to Thermoplastics with Friction Stir Welding," KTH-Royal Institute of Technology, 2012.
 - [14] B. C. Liechty and B. W. Webb, "The use of plasticine as an analog to explore material flow in friction stir welding," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 184, no. 1–3, pp. 240–250, 2007.
 - [15] B. Vijendra and A. Sharma, "Induction heated tool assisted friction-stir welding (i-FSW): A novel hybrid process for joining of thermoplastics," *J. Manuf. Process.*, vol. 20, pp. 234–244, 2015.
 - [16] S. Eslami, T. Ramos, P. J. Tavares, and P. M. G. P. Moreira, "Shoulder design developments for FSW lap joints of dissimilar polymers," *J. Manuf. Process.*, vol. 20, pp. 15–23, 2015.
 - [17] American Welding Society, *AWS D17.3, Specification for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys for Aerospace Applications*, 1st ed. Miami, FL, 2009.
 - [18] ISO, "ISO 25239-1:2011: Friction stir welding — Aluminium Part 1: Quality and inspection requirements," *BSI Stand. Publ.*, 2011.
 - [19] N. Busu, M. S. Jaffarullah, C. Y. Low, M. S. B. Shaari, Armansyah, and A. Jaffar, "A Review of Force Control Techniques in Friction Stir Process," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 76, no. Iris, pp. 528–533, 2015.
 - [20] ASTM International, *ASTM E8 / E8M-13, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, vol. 2. 2013.



Diseño y Construcción de una Impresora 3D Tipo Delta por el Método de Despliegue de la Función Calidad QFD

Design and Construction of a 3D Printer Type Delta by the Deployment Method of the QFD Quality Function

Edgar D. Díaz¹, Rafael A. Ramírez^{1, γ}, Edgar A. Torres², María L. Pinto², Wilman A. Pineda²

¹ Diseñador Industrial. Estudiante Maestría en Metalurgia y Ciencia de los Materiales

² Investigadores Grupo de Energías y Nuevas Tecnologías GENTE. Docentes Programa de Ingeniería Electromecánica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, *γ. Autor correspondal: edgardario.diaz@uptc.edu.co*

Resumen

Se presentan los resultados del diseño de una impresora 3D tipo delta como dispositivo experimental para el área de prototipado rápido, mediante el desarrollo de un trabajo que integra perspectivas de Ingeniería Electromecánica y de Diseño Industrial, en el diseño de maquinaria y equipo, buscando no solo cumplir unas especificaciones técnicas y análisis de las variables electrónicas y mecánicas, sino también la concepción de un producto desde un punto de vista que involucra al usuario final del mismo en la etapa temprana de diseño por medio de la aplicación del método de despliegue de función de calidad QFD (Quality Function Deployment) siguiendo las etapas plateadas en [1] considerando además la experiencia de su aplicación en el diseño previo de impresoras 3D de tipo cartesiano como las presentadas en [2], [3] y [4] ver Figura 1.

El trabajo contiene un aporte para el área de diseño de maquinaria y equipo, propone el diseño de una impresora 3D delta, verificando el cumplimiento de las características técnicas, así como la selección de componentes y materiales en función de las necesidades de los usuarios finales para el área de prototipado rápido. Aunque ya se comercializan dispositivos de impresión en configuración paralela, el ejercicio de su diseño, permite comprobar conceptos en sistemas mecánicos complejos de cadenas cinemáticas cerradas; la integración de software para la simulación y control de máquinas de posicionamiento a partir de información de archivos CAD; el análisis de materiales y el estudio de procesos de modelado por deposición fundida.

Se construye una plataforma de impresión 3d tipo delta, con un sistema de deposición de material de tipo FDM, un extrusor que me permite trabajar con materiales como el PLA y el ABS, una base de calentamiento para el material y una estructura que permite integrar los componentes electrónicos del equipo así mismo el fácil acceso del usuario ver Figura 2.

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia por los recursos para la ejecución del proyecto a través de las convocatorias de capital semilla.

Palabras clave: Impresión 3d, Delta, QFD, Prototipado, FDM.

Abstract

The results of the design of a delta type 3D printer are presented as an experimental device for the rapid prototyping area, through the development of a work that integrates perspectives of Electromechanical Engineering and Industrial Design, in the design of machinery and



equipment, seeking not only to meet technical specifications and analysis of the electronic and mechanical variables, but also the conception of a product from a point of view that involves the final user of the same in the early stage of design by medium of the application of the QFD quality function deployment method (Quality Function Deployment) following the silver steps in [1] considering also the experience of its application in the previous design of 3D cartesian type printers as presented in [2] , [3] and [4] see Figure 1.

The work contains a contribution for the design area of machinery and equipment, proposes the design of a delta 3D printer, verifying the compliance of the technical characteristics, as well as the selection of components and materials according to the needs of the end users. the area of rapid prototyping. Although printing devices are already commercialized in parallel configuration, the exercise of their design allows to check concepts in complex mechanical systems of closed kinematic chains; the integration of software for the simulation and control of positioning machines based on information from CAD files; the analysis of materials and the study of molded deposition modeling processes.

A delta type 3d printing platform is built, with a material deposition system of the FDM type, an extruder that allows me to work with materials such as PLA and ABS, a heating base for the material and a structure that allows integrating the Electronic components of the equipment likewise easy user access see Figure 2.

The authors express their gratitude to the Pedagogical and Technological University of Colombia for the resources for the execution of the project through the calls for seed capital.

Keywords: 3d printing, Delta, QFD, Prototyping, FDM.



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D TIPO DELTA EXPERIMENTAL EL AREA DE PROTOTIPADO RÁPIDO

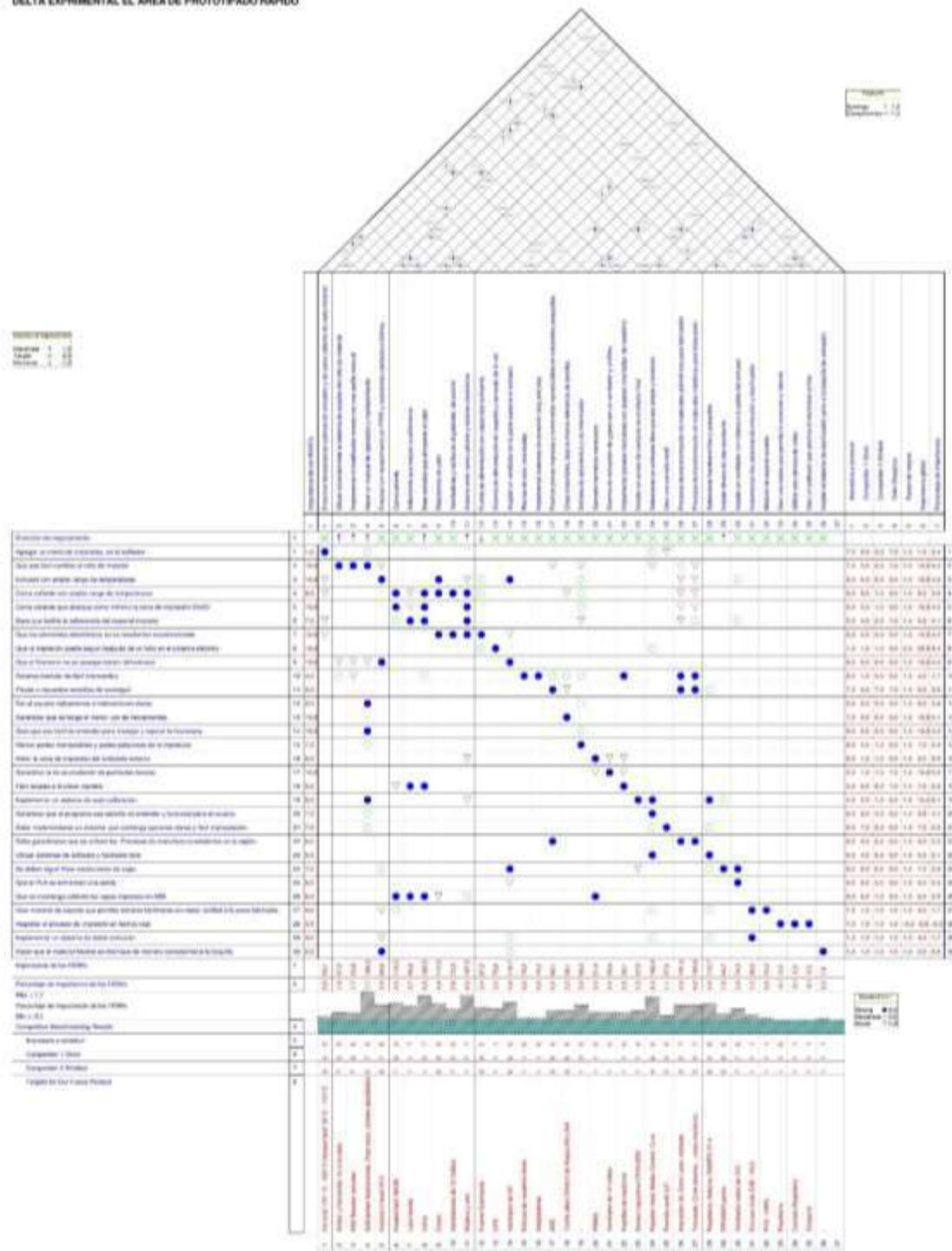


Figura 1: Matriz QFD para el diseño y construcción de una impresora 3d tipo delta experimental para el área de prototipado rápido

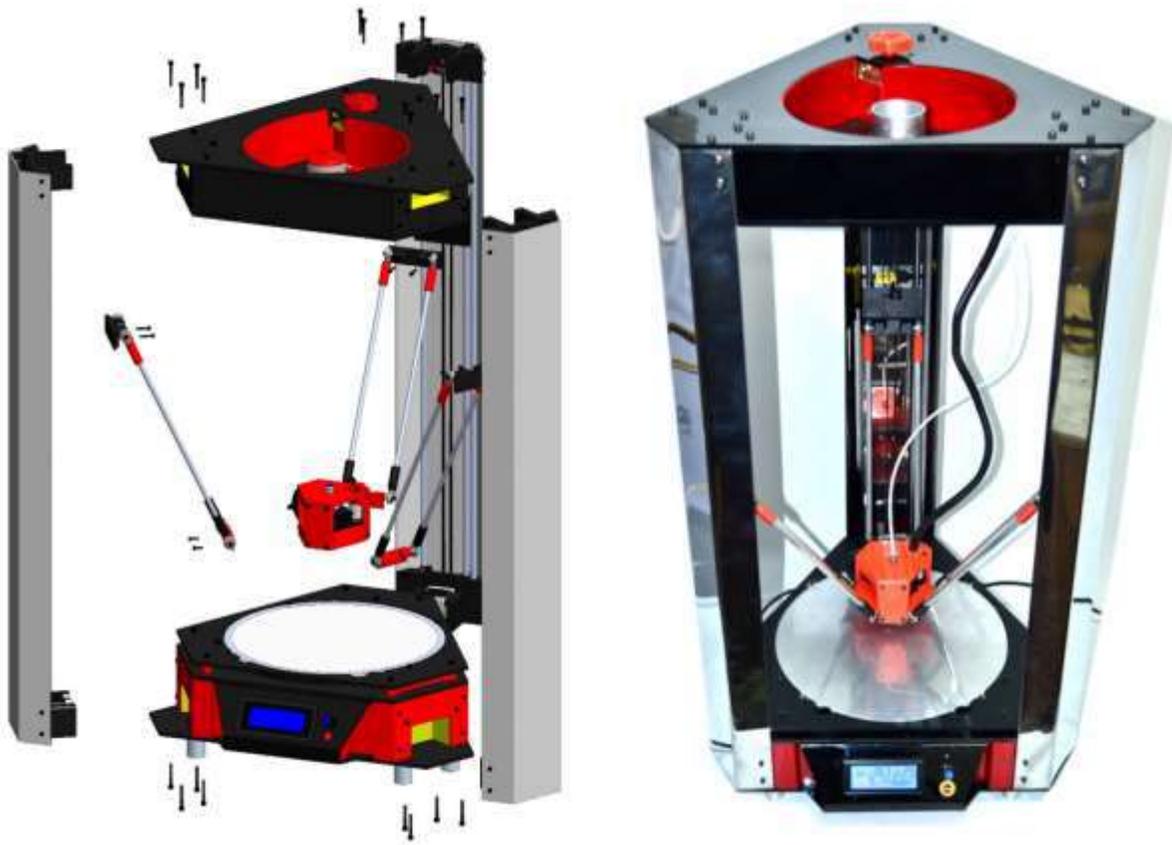


Figura 2: Prototipo final de la impresora 3d tipo delta.

Referencias

- [1] GONZÁLEZ, Marvín. "QFD, La Función Despliegue de la Calidad; Una guía práctica para escuchar la voz del cliente". México: Mc Graw Hill, 2001..
- [2] Ertekin, Yalcin, et al. Interdisciplinary Senior Design Project to Develop a Teaching Tool: Dragon Conductive 3D Printer. 121st ASEE Annual Conference & Exposition, American Society for Engineering Education, Indianapolis 2014.
- [3] R. Vongvit, "Using the Fuzzy-QFD for Product Development: A Case Study for 3D Printer", Applied Mechanics and Materials, Vols. 789-790, pp. 1196-1200, 2015.
- [4] Cortes E. y otros. Desarrollo de un robot paralelo 5R para la impresión en 3D. memorias ponencias orales IV Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica y Automatización - CIIMA 2015. Escuela de Ingeniería de Antioquia. 2015..



Acercamiento Teórico al Análisis de Estabilidad de una Microrred Durante los Saltos entre Modos de Operación

Theoretical Approach to the Stability Analysis of a Microgrid While Switching Between Its Operation Modes

César Augusto Rodríguez Duque¹, Alonso de Jesús Chica Leal^{2, γ}, Sergio Alejandro Díaz Contreras³, Fabián Sánchez Salazar⁴

1,4. Departamento de Matemáticas, Universidad Central, Bogotá, Colombia

2,3. Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad Central, Bogotá, Colombia

γ. Autor corresponsal: achical@ucentral.edu.co

Resumen

Este trabajo presenta un acercamiento teórico al análisis de estabilidad durante los saltos que se presentan en una microrred entre los modos de operación en isla y conectado a red, cuando los interruptores estáticos de potencia conmutan debido a una decisión programada o como respuesta a un fallo. De esta manera, debido a que una microrred puede operar tanto en modo isla y modo red, se debe mantener la estabilidad tanto de frecuencia como de tensión en cada uno de los modos de operación, sin embargo, no se reporta en la literatura qué sucede con la estabilidad mientras se realizan los saltos entre modos de operación, lo cual dificulta garantizar un suministro continuo de potencia a las cargas conectadas. Después de una revisión sobre métodos de análisis de estabilidad de sistemas dinámicos entre los que se encuentran los autovalores, Lyapunov, algebra de Lie, entre otros, en este trabajo se presenta un acercamiento al análisis de estabilidad durante el transiente entre modos de operación.

Para este análisis se parte de un modelo en pequeña señal para cada uno de los modos de operación de la microrred con base en inversores en paralelo, teniendo en cuenta que se encuentran controlados mediante el enfoque droop para el reparto de potencia activa y reactiva. Se muestran unas simulaciones realizadas en Matlab/Simulink para evaluar el acercamiento y finalmente se muestran unas conclusiones..

Palabras clave: Estabilidad de frecuencia y tensión, inversor de tensión, modelo de pequeña señal.

Abstract

This paper presents a theoretical approach to the stability analysis of a microgrid for the duration of the jumping between the islanded mode and grid connected mode, this is, while the static transfer switch changes its state due to a programmed decision or as a response to an electrical fault. In this way, since a microgrid may operate in islanded mode or in grid connected mode, it is mandatory to guarantee frequency and voltage stability on each of the operation modes, nonetheless, the stability behavior while switching between these operation modes have not been reported in the literature, which makes difficult to guarantee a constant power flow to the connected loads. After a revision of different stability analysis methods for dynamical systems such as, eigenvalues, Lyapunov, Lie Algebra, among others, this work presents and approach to the stability analysis of the transient between operation modes.



The analysis presented here is based on the small-signal model of each one of the operation modes of the inverter-based microgrid, this is done by considering that the active and reactive power sharing among the inverters is controlled by means of Droop curves. In order to evaluate the studied approach, simulations carried in Matlab / Simulink are shown, finally, conclusions are given.

Keywords: Voltage and Frequency Stability, Voltage Inverter, Small-signal model

Referencias

- [1] D. Liberzon, P. Hespanha, A. Stephen Morse, "Stability of switched systems: a Lie-algebraic condition," 1999 *Systems & Control Letters*, Volume 37, Issue 3, 1999, pp. 117-122.
- [2] E. P. Correa, M. Mezaroba and G. M. S. Azevedo, "Reduced-order model of AC microgrid for stability analysis and adjustment of droop control," *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, Juiz de Fora, 2017, pp. 1-6.



Rechazo de perturbaciones en Robots Bípedos Dinámicos

Disturbance Rejection on Dynamic Bipedal Robots

Jaime Arcos Legarda^{1, γ}, John Cortes Romero², Andres Tovar³

1. Department of Mechanics and Mechatronic Engineering, Universidad Nacional de Colombia
2. Department of Electrical and Electronic Engineering, Universidad Nacional de Colombia
3. Department of Mechanical and Energy Engineering, Indiana University-Purdue University Indianapolis

γ. Autor correspondiente: wjarcosl@unal.edu.co

Resumen

Background: El rechazo de perturbaciones ha sido una de las principales preocupaciones del control de robots bípedos dinámicos. Los robots bípedos están expuestos a perturbaciones externas inesperadas, las cuales junto con las incertidumbres inherentes de sus modelos dificultan el diseño de controladores efectivos. Con el objetivo de lograr caminatas estables se han desarrollado leyes de control robusto en conjunción con generadores de patrones de marcha [1]. La efectividad de dichas estrategias de control ha sido evaluada en múltiples prototipos robóticos en ambientes de prueba controlados [2]; sin embargo, el control robusto de la caminata en ambientes exteriores, llenos de incertidumbres, es un tema de investigación activo.

Propósito: El objetivo de este trabajo es desarrollar una estrategia de control adaptativo para rechazar los efectos de las perturbaciones en la caminata de robots bípedos dinámicos. Estos robots se describen con modelos híbridos que integran dinámicas continuas y discretas. Con el objetivo de rechazar el efecto de las perturbaciones en la dinámica híbrida se ha propuesto una estrategia de control híbrido.

Métodos: La estrategia de control propuesta usa dos lazos de control anidados: un lazo interno para seguimiento de trayectorias y un lazo de control externo para generar trayectorias. El lazo de control interno usa una estrategia de control no lineal robusta. El lazo de control externo usa el concepto de restricciones holonómicas virtuales junto con la dinámica híbrida cero para, fuera de línea, generar patrones de marcha periódicamente estables.

Resultados: La efectividad de la estrategia de control propuesta ha sido evaluada numéricamente en simulación. Los resultados fueron verificados con experimentación en un prototipo de robot bípedo planar, el cual fue diseñado con piernas terminadas en punta y fabricado para evaluar las estrategias de control propuestas.

Palabras clave: Control con Rechazo de Perturbaciones, Robots Bípedos Dinámicos, Dinámica Híbrida, Restricciones Holonómicas Virtuales, Control No Lineal.



Referenciass:

- [1] E. R. Westervelt, J. W. Grizzle, C. Chevallereau, J. H. Choi and B. Morris, Feedback control of dynamic bipedal robot locomotion, CRC press, 2007.
- [2] J. W. Grizzle and C. Chevallereau, "Virtual Constraints and Hybrid Zero Dynamics for Realizing Underactuated Bipedal Locomotion," *arXiv preprint arXiv:1706.01127*, 2017.

Abstract

Background: Disturbance rejection has been one of the main concerns in the control of dynamic bipedal robots. Their model contains inherent uncertainties and their outdoor operation involves exposure to unexpected external disturbances. In order to achieve stable walking, robust feedback control laws in conjunction with gait pattern generators has been developed [1]. The effectiveness of such approaches has been evaluated in multiples physical robots on controlled environments [2]; however, the task of robust walking in outdoor environment over uncertain terrains is an unsolved problem.

Purpose: The objective of this work is to develop an adaptive control strategy to reject the disturbance effects in the walking of dynamic bipedal robots. The dynamic bipedal robots are described with a hybrid model that integrates continuous and discrete dynamics. In order to reject the effect of the disturbances in the hybrid dynamics of the robot, a hybrid control strategy is proposed.

Methods: The proposed control strategy uses two nested loops: an inner-loop to track gait trajectories and an outer-loop to generate the trajectories. The inner-loop uses a robust nonlinear control to perform tracking trajectories. The outer-loop uses the concepts of virtual holonomic constraints and hybrid zero dynamics to off-line generate gait pattern with periodic stability.

Results: The effectiveness of the proposed gait pattern generator has been evaluated with numerical simulations. The results have been verified with physical testing on a planar bipedal robot designed and built from scratch with point feet legs.

Keywords: Disturbance Rejection Control, Dynamic Bipedal Robots, Hybrid Dynamics, Virtual Holonomic Constraints, Nonlinear Control.

References:

- [1] E. R. Westervelt, J. W. Grizzle, C. Chevallereau, J. H. Choi and B. Morris, Feedback control of dynamic bipedal robot locomotion, CRC press, 2007.
- [2] J. W. Grizzle and C. Chevallereau, "Virtual Constraints and Hybrid Zero Dynamics for Realizing Underactuated Bipedal Locomotion," *arXiv preprint arXiv:1706.01127*, 2017.



Manufactura Aditiva Aplicada al Diseño de Moldes de Inyección

Additive Manufacturing Applied to the Design of Injection Molds

Paula Andrea Capera Tobar^{1, γ}, Camilo Andrés Arias Niño¹, Álvaro José Rojas Arciniegas¹, Miguel Ángel Hidalgo Salazar¹

1. Valle del Cauca, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia

γ. Autor correspondiente: paula.capera@uao.edu.co

Resumen

Hoy en día es conocido que el proceso de inyección de termoplásticos (PI) es un proceso de manufactura muy común y seleccionado para el desarrollo de diversos productos para aplicaciones en casi todas las áreas [1]. Para el PI, los polímeros se funden y son inyectados con presiones altas a un molde de acero frío. Estos polímeros, son solidificados a presión y el moldeo es expulsado, obteniendo la pieza o producto. Existen en el mercado diversas máquinas para PI, pero la más común es la máquina de tornillo alternativa (Figura N°1), a pesar de los altos costos que estos tienen.

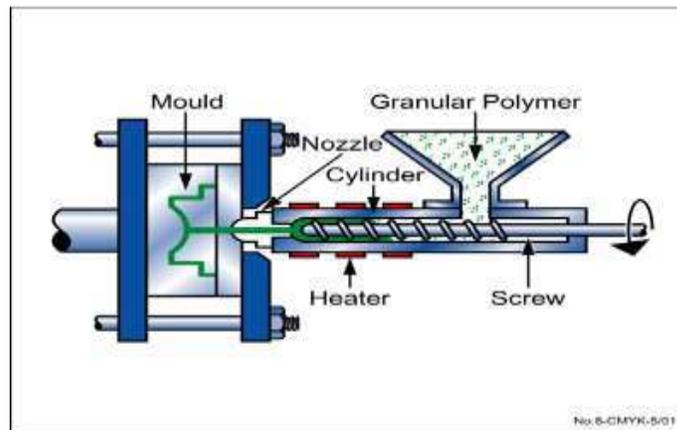
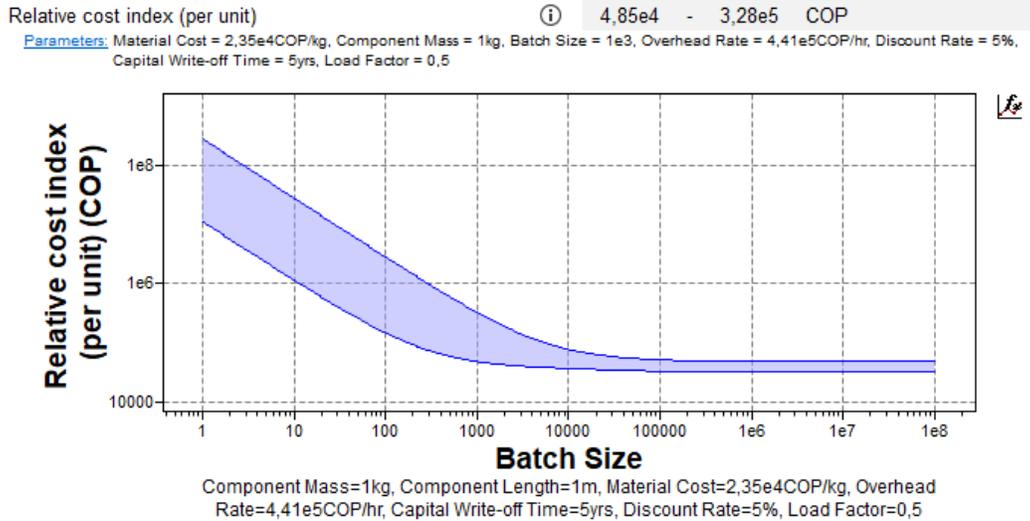


Figura 1: Máquina de tornillo alternativa [5]

Los procesos de fabricación de moldes son complejos, y requieren tecnología CAD/CAM/CAE [2] y una adecuada selección de materiales, para conseguir una vida útil prolongada, esencialmente por que el proceso es típicamente viable posterior a 10.000 piezas y la inversión requerida se justifica desde esa cantidad, como se puede observar en la gráfica costo relativo por unidad vs el lote de piezas que se pueden obtener con el molde (Gráfica N°1) [3].



Gráfica 1: Costo relativo por unidad vs tamaño del lote de producción [5]

La manufactura aditiva (MA) comprende los procesos en los que se adiciona material capa por capa para generar la geometría tridimensional (3D) deseada, partiendo de un modelo 3D de donde se obtiene información de las secciones transversales a construir en el plano XY y que se irán acumulando en el eje Z hasta formar la pieza [4].

Dentro de las etapas del diseño de producto (Figura N°2), cuando ya se ha seleccionado como proceso de manufactura PI y en la etapa de prototipado 2, es posible utilizar MA para realizar insertos de moldes con las geometrías deseadas de las piezas a fabricar y producir muestras del producto inyectado en los materiales susceptibles de ser utilizados en la producción final, a un costo mucho menor y con geometrías difíciles de realizar por los procesos de fabricación sustractivos. Con este método se puede obtener series cortas de hasta unas 500 muestras.

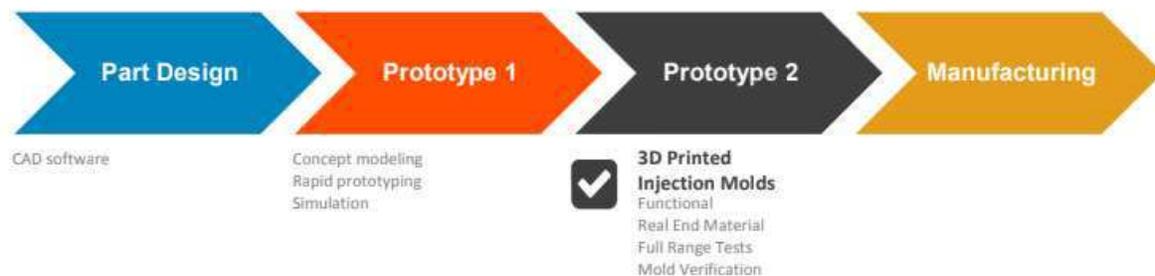


Figura 2: Etapas del diseño de productos [6]



Caso de estudio

Synergy, una empresa de desarrollo de productos ubicada en Netanya (Israel), adquirió una impresora 3D Polyjet Stratasys J750. La impresora crea prototipos del producto completo en pocas horas. Esta empresa se encontraba trabajando en el rediseño de un teclado para un sistema de respuesta de emergencia para automóviles. Para realizar el proyecto fue necesaria la creación de múltiples diseños del panel, que iría montado encima del espejo retrovisor. Si no se hubiese contado con la impresora, se habría tenido que recurrir a varios proveedores para crear un único prototipo de panel de teclado, tardando de diez a catorce días creándolo, con un coste de \$700 USD/unidad. Con la impresora 3D, solo se tardó unas horas y el coste fue de \$200 USD/unidad. Al realizar la comparación entre la Stratasys J750 como MA y los métodos de manufactura tradicionales para este caso, la diferencia en el costo es de \$500 USD (ahorro del 71%) y el plazo de entrega pasó de 14 días a 9 días [7].

De manera local, en la Universidad autónoma de Occidente (UAO) se está realizando investigaciones relacionadas a la fabricación de moldes de inyección a partir de procesos MA, hasta la fecha se han obtenido resultados negativos implementando el proceso FDM (Modelado por Deposición Fundida) y resultados prometedores con el proceso Polyjet, obteniendo como resultado un inserto para molde hecho con ABS digital para la fabricación de probetas (Figura N°3).



Figura 3: Inserto realizado con tecnología polyjet. Grupo de investigación GITEM UAO

Palabras clave: Moldeo por inyección, Manufactura aditiva, Polyjet, Polímero.

Abstract

Nowadays it is known that the process of thermoplastic injection (IP) is a very common manufacturing process and selected for the development of various products for applications in almost all areas [1]. For the IP, the polymers melt and are injected with high pressures into a cold



steel mold. These polymers are solidified under pressure and the molding is ejected, obtaining the piece or product. There are several machines for IP in the market, but the most common is the alternative screw machine (Figure N°1), regardless of the high costs they have.

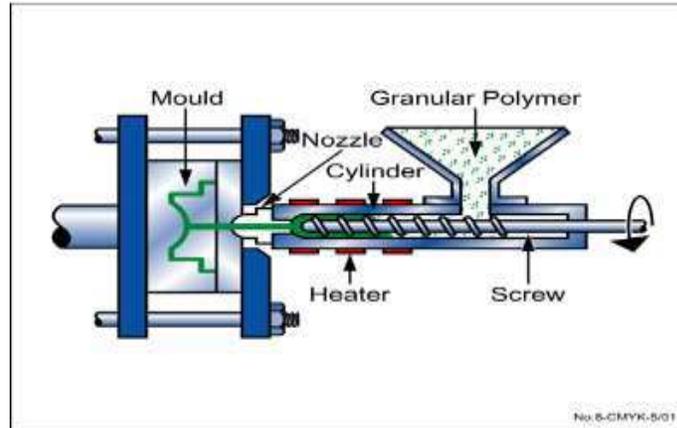
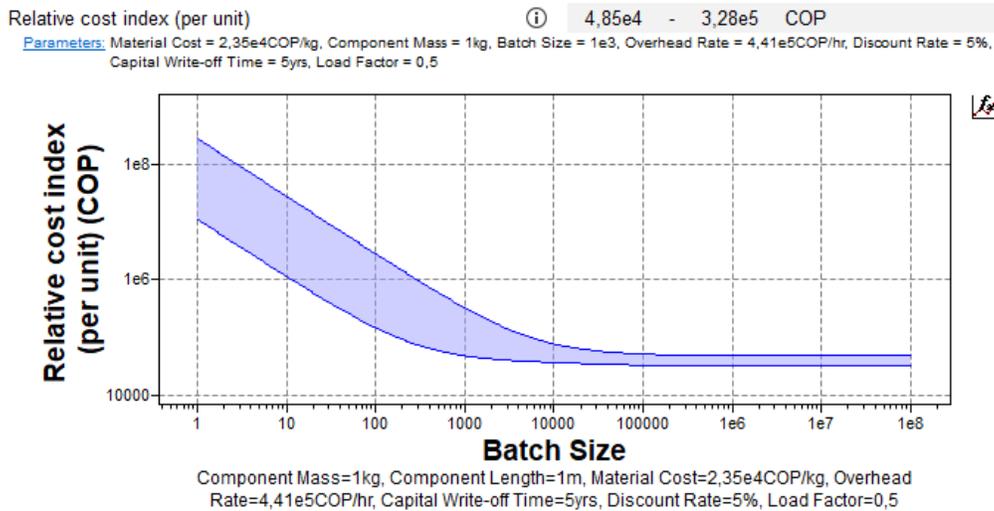


Figure 1: Alternative Screw Machine [5]

The manufacturing processes of molds are complex, and require CAD / CAM / CAE technology [2] and an appropriate selection of materials, to achieve a prolonged useful life, essentially because the process is typically viable after 10,000 pieces and the required investment is justified from that amount, as can be seen in the graph relative cost per unit vs the batch of pieces that can be obtained with the mold (Graph N°1) [3].



Graph 1: Relative cost per unit vs the batch size [5]

Additive manufacturing (MA) contains processes in which material is added layer by layer to generate three-dimensional geometry (3D) desired, starting from a 3D model where information is obtained from the cross sections to be built in the XY plane and that will accumulate in the Z axis until the piece is formed [4].



Within the stages of the product design (Figure N°2), when the plastic injection has been selected as a manufacturing process and in the stage 2 of prototyping, it is possible to use MA to make mold inserts with the desired geometries of the pieces to manufacture and produce samples of the product injected into the materials that can be used in the final production, with a lower cost and with geometries that are difficult to make due to the subtractive manufacturing processes. With this method you can obtain short series of up to 500 samples.

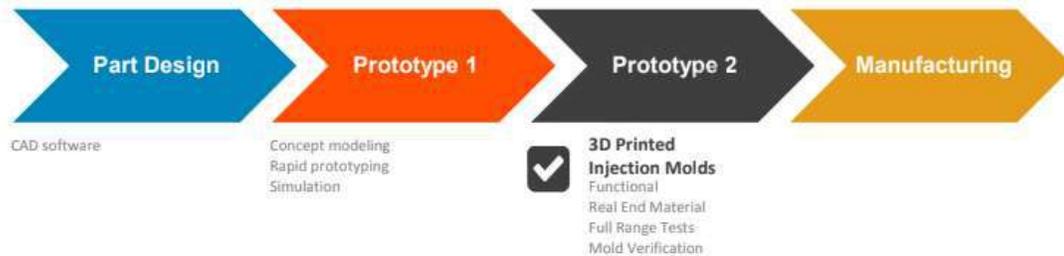


Figure 2: Stages of product design [6]

Study case

Synergy, a product development company in Netanya, Israel, acquired a Stratasys J750 Polyjet 3D printer. The printer creates prototypes of the complete product in a few hours. This company was working on the redesign of a keyboard for an emergency response system for automobiles. To make the project was necessary to create multiple panel designs, which would be mounted on the rearview mirror. If the printer had not been available, they had had to looking for several providers to create a single prototype keyboard panel, with a cost of \$ 700 USD / unit. With the 3D printer, it only took a few hours and the cost was \$ 200 USD / unit. Making a comparison between the Stratasys J750 and the traditional manufacturing methods for this case the difference in cost is \$500 USD / unit (saving 71%) and the delivery time went from 14 days to 9 days [7].

Actually, at Universidad Autonoma de Occidente (UAO) are conducting research related to the manufacture of injection molds with AM processes, to date negative results were obtained by implementing the FDM process (Fused Deposition Modeling) and promising results with the Polyjet process, getting as a result a molding insert made with digital ABS for the manufacture of test specimens for mechanical tests (Figure N°3).



Figure 3: Insert made with polyjet technology. GITEM UAO Research group



Keywords: Injection molding, additive manufacturing, polyjet, polymer.

Referencias

- [1] Ramírez, A. S. (1995). Procesos de transformación de plásticos por inyección: aplicaciones en materiales de ingeniería. *Informador Técnico*, 51, 11-19.
- [2] Lorenzo Yustos, H. (2008). Aplicación de nuevas tecnologías en la realización de herramientas para moldes de inyección de termoplásticos (Doctoral dissertation, Industriales)
- [3] Design and Manufacture of Plastic Parts, Brown, R. L. E. (1980), Design and Manufacture of Plastic Parts, John Wiley & Sons, New York, USA.
- [4] ASTM International. (2013). F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. Rapid Manufacturing Association, 2.
- [5] CES EduPack software, Granta Design Limited, Cambridge, UK, 2014 (www.grantadesign.com).
- [6] Ar, I. C. S. S. T. (n.d.). Evolution of plastics materials according to different uses and applications 3D Printing and Injection Molding.
- [7] Daley, L. (2017). Reinventing Invention. *Australian Feminist Law Journal*, 43(1), 145–159.



Estudio Experimental del Arrastre Aerodinámico en Vehículos Ligeros

Experimental Study of the Aerodynamic Drag on Light Vehicles

Sebastián Porras^{1,γ}, Alejandra Polanco², Sergio Roa¹, Daniel Suarez², Omar López¹, Luis Muñoz¹

1. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

2. Departamento de Ingeniería Industrial, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

γ. Autor correspondencia: s.porras11@uniandes.edu.co

Resumen

Cuando se analiza el comportamiento aerodinámico de un vehículo, se suelen utilizar estimaciones experimentales en túnel de viento o simulaciones numéricas CFD (computational fluid dynamics, por sus iniciales en inglés). Sin embargo, como se menciona en [1], estos acercamientos tienen un limitante al tratar de replicar los fenómenos con los que se encuentra el vehículo en su operación normal. Esto es de particular importancia en vehículos ligeros, ya que la disipación de potencia asociada a las fuerzas de arrastre aerodinámico suele ser muy importante. Este trabajo presenta los resultados de un estudio enfocado en la medición experimental de las características del arrastre aerodinámico de un vehículo ligero, entendido como aquel con una masa comparable o menor a la de su piloto.

Metodológicamente, se inició con una etapa de refinamiento del modelo numérico utilizado para identificar los parámetros resistivos (i.e., coeficiente de rodadura, f_r , y área de arrastre aerodinámico, C_{DA}), partiendo del modelo presentado en [2]. Posteriormente, se evaluaron alternativas para la adquisición de los datos requeridos. El siguiente paso fue adelantar el diseño formal del experimento, centrado en un proceso de identificación en el cual se midieron los parámetros cinéticos del movimiento de la bicicleta. El paso final fue el refinamiento del procesamiento de los datos obtenidos. La metodología se probó en un caso de estudio. Se usó como vehículo de prueba una bicicleta de ruta. El ciclista adoptó siempre una postura con las manos en la parte baja del manubrio. La instrumentación se realizó con un sistema de anemometría abordo diseñado a la medida del vehículo, en conjunto con instrumentación para medir la entrega de potencia del ciclista, las variables cinemáticas de la bicicleta, y la inclinación de la vía usada para las pruebas. Las pruebas se realizaron en un segmento de una vía para tránsito exclusivo de bicicletas en la ciudad de Bogotá. La bicicleta instrumentada se muestra en la Figura 1.

Como resultado de la implementación del caso de estudio se registró un valor nominal de C_{DA} de 0.34 m^2 , con una incertidumbre de 0.02 m^2 . La incertidumbre asociada a la medición varía según el número de velocidades contempladas en el diseño experimental como se muestra en la Figura 2.

Palabras clave: Arrastre aerodinámico, vehículos ligeros, pruebas en ruta, anemometría abordo.



Abstract

When the aerodynamic performance of a vehicle is analyzed, wind tunnel experimental estimations or numeric CFD-based simulations are the most commonly used tools. However, as said in [1], these approaches have certain limitations when trying to replicate normal operating conditions phenomena. This is a special concern in light vehicles, in which the power dissipation associated with the aerodynamic drag force is usually very important. This paper presents the results of a study about the experimental measurement of the aerodynamic drag characteristics of a light vehicle, understood as a vehicle with a mass that is equal or less than the mass of its pilot.

Methodologically, the first stage consisted in a refinement of the numeric model used to identify the resistive parameters (e.g. rolling coefficient, f_r , and aerodynamic drag area, C_{DA}), based on the model presented in [2]. Afterward, alternatives for data acquisition were evaluated. The next step was the design of the experiment, focused in an identification process in which kinetic parameters of the bicycle were measured. Finally, a refinement of the collected data processing was carried out. The methodology was tested in a specific case of study. A road bicycle was used as the test vehicle. The instrumentation consisted in: an on-board anemometry system designed to fit the vehicle's geometric requirements, a power meter in the pedals, a sensor for measuring bicycle's kinematic variables and instruments required to measure the road slope of the test track. The tests were performed in a segment of a road for exclusive transit of bicycles in Bogotá. The bicycle with the instrumentation is showed in Figure 1.

As result of the implementation of the case of study, the C_{DA} was registered with a nominal value of 0.34 m^2 and an uncertainty of 0.02 m^2 . The uncertainty associated to the coefficient estimation depends on the number of speeds considered in the experimental design as presented in Figure 2.

Keywords: Aerodynamic drag, light vehicles, road tests, on-board anemometry.



Figura 1. Prototipo de medición de anemometría ubicado en la bicicleta.

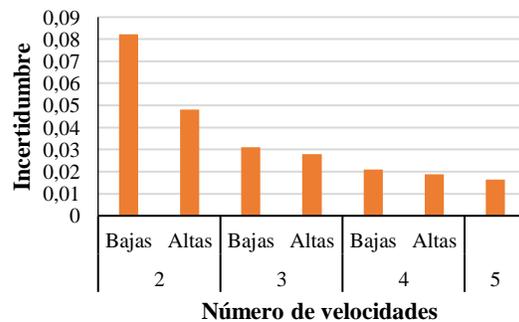


Figura 2. Representación de la incertidumbre dependiente del número de velocidades. Se hace distinción entre altas velocidades y bajas velocidades.



Referencias

- [1] J. C. Páscoa, F. P. Brójo, F. C. Santos y P. C. Fael, «An innovative experimental on-road testing method and its demonstration on a prototype vehicle,» *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 26, n° 6, pp. 1663-1670, 2012.
- [2] S. D. Roa, M. Morales y L. E. Muñoz, «Onboard Wind Speed and Road Grade Measurements for Determination of Model Coefficients on Cycling,» ASME, Cleveland, 2017.



Influencia del Espesor en el Comportamiento a Flexión de Vigas Simétricas Elásticas Sujetas a Grandes Deflexiones

Influence of Thickness on Bending Behavior of Symmetrical Elastic Beams Subjected to Large Deflections

Lisseth Katherine Ramírez Antolínez^{1, γ}, César Augusto Álvarez Vargas²

1. Maestría en Ingeniería, Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, Colombia
2. Departamento de Mecánica y Producción, Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, Colombia

γ. Autor corresponsal: Lisseth.ramireza@autonoma.edu.co

Resumen

El ensayo de flexión de tres puntos mide la fuerza que se requiere para doblar una viga bajo condiciones de carga de tres puntos; durante dicho ensayo la viga es soportada por un rodillo en cada extremo, mientras que un tercer rodillo en la parte central es el encargado de aplicar una carga que origina flexión con lo que su eje se deforma en una curva, comúnmente conocida como la curva de flexión de la viga.

El módulo de flexión, el comportamiento esfuerzo-deformación y los límites de falla en flexión pueden obtenerse usando la geometría simple de un ensayo de flexión de tres puntos. Estos ensayos se aplican en materiales poliméricos de acuerdo a la norma técnica ASTM D790 [1], y en materiales metálicos según la norma técnica ASTM E290 [2].

La teoría clásica de deflexión de vigas desprecia el cuadrado de la primera derivada en la ecuación del momento de flexión y no puede ser utilizada cuando las pendientes de la viga son grandes. En muchos casos no se pueden obtener grandes deflexiones sin forzar a la viga plásticamente, pero cuando el espesor de la viga es pequeño comparado con su anchura, son posibles grandes deflexiones dentro del límite elástico del material [3]. La teoría de flexión lineal ofrece una buena aproximación cuando la flexión es pequeña. Esta teoría se usa efectivamente para el análisis de los problemas de flexión de vigas manufacturadas de materiales metálicos [4].

El problema para grandes deflexiones ha sido tratado por muchos investigadores [5], no obstante la mayoría de los autores no plantea el dominio de la solución y presenta soluciones mediante modelos analíticos sin considerar la verificación a través de un diseño experimental además de asumir despreciable el espesor de la viga para la simplificación del problema.

El planteamiento anterior conllevó a analizar la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo influye el espesor en el comportamiento a flexión a tres puntos de una viga simétrica elástica sujeta a grandes deflexiones?

A través del presente trabajo de investigación se estudió el fenómeno de flexión a tres puntos para el caso de grandes deflexiones en materiales elásticos simétricos teniendo en cuenta la variación de espesor de acuerdo a la siguiente descripción: i. descripción de un modelo analítico adaptado de Batista [5] para el comportamiento a flexión, ii. Desarrollo de un modelo experimental para verificar o refutar la validez del modelo. Los resultados muestran que el



espesor (en el dominio dispuesto por las normas ASTM [1] - [2]) es determinante en la conceptualización del modelo de flexión a tres puntos.

Palabras clave: diseño experimental, elasticidad, grandes deflexiones, prueba de flexión de tres puntos.

Abstract

Three-point bending test determines the force required to bend a beam under load conditions of three points, during this test the beam is supported by one roller at each of its ends, while a third one in the middle of the clear of the beam applies a load that causes bending deforming the central line of the beam, commonly known as the bended curve.

The flexural modulus, the stress-strain behavior and the flexural failure limits can be obtained using the simple geometry of a three-point bending test. These tests are applied in polymeric materials according with the ASTM D790 technical standard [1], and in metallic materials according with the ASTM E290 [2] technical standard.

Classical beam deflection theory neglects the square of the first derivative in the bending moment equation and cannot be used when the beam slopes are large. In many cases large deflections cannot be obtained without forcing the beam plastically, but when the thickness of the beam is small compared to its width, large deflections are possible within the elastic limit of the material [3]. Theory of linear bending offers a good approximation when the bending is small. This theory is used effectively for the analysis of the bending problems of manufactured beams of metallic materials [4].

The problem for large deflections has been addressed by many researchers [5], however most of the authors do not propose the domain of the solution and presents solutions to analytical models without considering the verification through an experimental design in addition to assume negligible thickness of the beam for simplification of the problem.

Previous approach led to analyze the following research question: How did the thickness influence the flexural behavior at three points of an elastic symmetric beam subject to large deflections?

A través del presente trabajo de investigación se estudió el fenómeno de flexión a tres puntos para el caso de grandes deflexiones en materiales elásticos simétricos teniendo en cuenta la variación de espesor de acuerdo a la siguiente descripción: i. descripción de un modelo analítico adaptado de Batista [5] para el comportamiento a flexión, ii. desarrollo de un modelo experimental para verificar o refutar la validez del modelo. Los resultados muestran que el espesor (en el dominio dispuesto por las normas ASTM [1]- [2]) es determinante en la conceptualización del modelo de flexión a tres puntos.

Present research work studies the three-point test bending in elastic materials with large deflections including the thickness on the model according the following steps: i. develop an analytical model adapted from Batista [5] for bending behavior, ii. performance of an experimental model to verify or refuse the proposed model. Results show that thickness (on proposed domain by ASTM [1] – [2]) is relevant for the three-point bending modeling.



Key words: experimental design, elasticity, large deflections, three-point bending test.

Referencias

- [1] ASTM, “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials 1,” in *Annual Book of ASTM Standards*, no. C, 2011, pp. 1–11.
- [2] ASTM, “Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility,” *Annu. B. ASTM Stand.*, no. Reapproved 2004, pp. 1–8, 2004.
- [3] J. G. Freeman, “Mathematical Theory of Deflection of Beam,” *Philos. Mag. Ser.*, p. 855–862., 1945.
- [4] A. Ohtsuki, “An analysis of large deflections in a symmetrical three point bending of beam,” *JSME*, vol. 29, 1986.
- [5] M. Batista, “Large deflections of a beam subject to three-point bending,” *Int. J. Non. Linear. Mech.*, vol. 69, pp. 84–92, 2015.



Análisis de un Motor Neumático de Paletas y su Potencial Aplicación en Vehículos Híbridos

Analysis of an Air Vane Motor and its Potential Application in Hybrid Vehicles

Christian Andres Bohorquez Jimenez^{1, γ}, Luis Ernesto Muñoz Camargo¹

1. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes, Bogotá D.C., Colombia
γ. Autor correspondencia: ca.bohorquez10@uniandes.edu.co

Resumen

Este documento presenta un análisis de la relación potencia-peso y la eficiencia de los motores neumáticos de paletas. El estudio se enfoca hacia el análisis de la posible implementación en un sistema de almacenamiento de energía por aire comprimido y super capacitores para vehículos híbridos neumáticos. Este método de almacenamiento de energía ha mostrado mejoras en la eficiencia del sistema en condiciones dinámicas de operación frente al almacenamiento neumático convencional, sin embargo, no han sido implementados en vehículos híbridos [1].

Metodológicamente, se inició con la caracterización experimental de un motor. Como paso siguiente, se utilizó la información experimental para alimentar un modelo basado en el uso de las líneas de Willan, el cual busco escalar el comportamiento observado para poder analizar una familia de motores, en vez de solo el motor medido. [2]

Se realizó la caracterización de un motor con potencia nominal de 330 W. El modelo implementado describe la relación entre la energía total que ingresa y la energía mecánica que genera el motor como función de la velocidad de operación, generando el mapa de operación del motor presentado en la ilustración 1. El modelo normaliza el desempeño del motor respecto al volumen de trabajo, lo que permite describir el comportamiento de las presiones media disponible y efectiva.

Con los parámetros dimensionales del modelo se estimó analíticamente el peso de un motor arbitrario. Se encontró que para un motor de paletas trabajando a velocidades entre 1800 y 3600 RPM la eficiencia máxima es de 11.8%, la cual es inferior al rango de 12% a 20% de eficiencia de los motores híbridos actuales. Por otra parte, para una misma entrega de potencia, el motor obtenido a partir del modelo presenta una reducción de peso de entre 65% y 85% respecto a su contraparte híbrida actual, manteniendo la capacidad de operar al mismo tiempo como compresor para sistemas de recuperación de energía.

Palabras clave: Motor neumático, super capacitores, líneas de Willan, vehículo híbrido neumático

Abstract

This document presents an analysis of the power-to-weight ratio and the efficiency of the pneumatic air vane motors. The study is focused on the analysis of the possible implementation on a compressed air and super capacitors energy storage system for hybrid pneumatic vehicles. This type of energy storage system has shown improvements on the overall system efficiency when



operating in dynamic conditions compared with conventional pneumatic energy storage; nevertheless, it has not been implemented on hybrid vehicles [1].

Methodologically, the first step was the characterization of a motor. Based on the characterization, a scalable model of the motor was developed by implementing the model of Willan's lines. The scope was to develop a tool to scale the observed behavior, which allows to analyze a family of motors. [2]

A motor with nominal power of 330 W, was characterized. The implemented model describes the relation between the energy input and the mechanical energy output of the motor as function of the operation speed, creating the operational map of the motor shown in the illustration 1. This model normalizes the performance of the motor with respect to the swept volume. The behavior of the available and effective mean pressures is obtained as one of the outputs of the model.

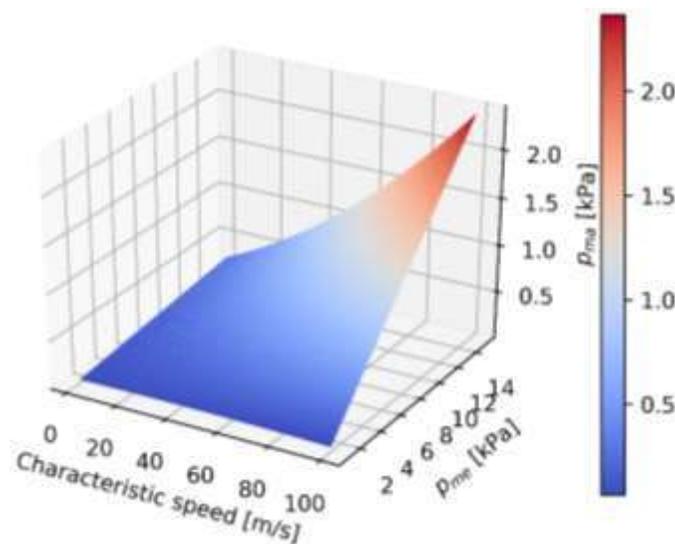


Illustration 1. Willan's lines scalable model obtained from the characterization of the air vane motor

Based on the dimensional parameters from the model, it was possible to estimate the weight of a motor. It was found that for a pneumatic vane motor working at speeds between 1800 and 3600 RPM a maximum efficiency of 11.8% is obtained, this efficiency is lower than the 12% to 20% range of efficiency of current conventional pneumatic hybrid motors. On the other hand, for the same power delivery, the motor obtained from the model has a weight reduction between 65% and 85% respect to its conventional hybrid counterpart, maintaining the ability to operate at the same time as an air compressor for energy recovery systems.

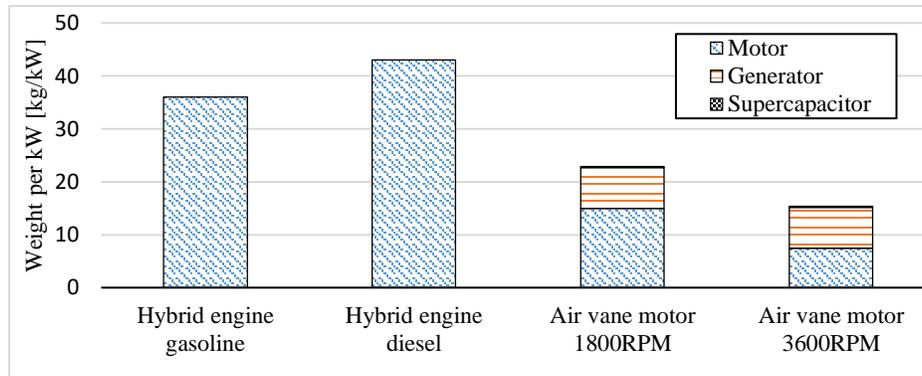


Illustration 2. Weight per kW of hybrid motors and theoretical air vane motors implemented on a compressed air and super capacitors energy storage system.

Keywords: Pneumatic motor, super capacitors, Willan's lines, Pneumatic hybrid vehicle.

Referencias

- [1] L. Sylvain and R. Alfred, "Hybrid energy storage systems based on compressed air and supercapacitors with maximum efficiency point tracking," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 53, no. 4, pp. 1105-1115, 2006.
- [2] G. Rizzoni, L. Guzzella and B. M. Baumann, "Unified Modeling of Hybrid Electric Vehicle Drivetrains," *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, vol. 4, no. 3, pp. 246-257, 1999.



Ciclo Atkinson: Una Alternativa para Mejorar la Eficiencia en Motores de Combustión Interna

Atkinson Cycle: A Way for Improving Efficiency in Internal Combustion Engines

Edison de Jesús Henao Castañeda^{1, γ}, Carlos Alberto Romero Piedrahita², Mauricio Monroy Jaramillo¹

1,3. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia

2. Facultad de Tecnologías, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia

γ. Autor correspondiente: edisonhenao@utp.edu.co

Resumen

Los ciclos expandidos como el desarrollado por Atkinson en motores de combustión interna (MCI), son utilizados para aprovechar mejor el combustible aumentando la eficiencia térmica. En el presente artículo es presentado desde el punto de vista de la mecánica de maquinaria y la teoría de grafos, las estructuras cinemáticas de Watt y Stephenson que mediante arreglos multi-eslabón permiten recrear el mecanismo presentado por James Atkinson. A través de un análisis cinemático, son evidenciados los problemas relacionados con las velocidades y aceleraciones del pistón que presentan estas estructuras cinemáticas y que comprometen su producción masiva. No obstante, se retoma el ciclo de Atkinson como posibilidad constructiva actualmente, cuando se dispone de avanzadas herramientas de hardware electrónico y de control.

Palabras clave: Ciclo expandido, Estructura Cinemática, Mecanismo Multi-eslabón, Ciclo Atkinson

Abstract

The expanded cycles, such as the one developed by Atkinson for internal combustion engines (ICM), are used to make a better use of fuel, increasing thermal efficiency. In the present paper it is presented from the point of view of the mechanics of machinery and graphs theory, the Watt's and Stephenson's kinematic structures, which by means of multi-link arrangements allow to recreate the mechanism presented by James Atkinson. By applying a kinematical analysis to these kinematic structures, there are revealed the problems related to the piston speeds and accelerations that prevented the massive introduction of the "classical Atkinson cycle" in automotive engines. Despite this fact, the Atkinson cycle is highlighted in this paper as a real promising constructive technology, given the advances in electronic hardware and control technologies.

Keywords: Expanded cycle, Kinematic structure, Multi-link Mechanism, Atkinson cycle.



Algoritmo de Control para Dibujar Figuras Geométricas con Chocolate en un Sistema de Posicionamiento Cartesiano

Control Algorithm to Draw Geometric Figures with Chocolate in a Cartesian Positioning System

Ruben Olmedo Joya Espnosa¹, María Luisa Pinto Salamanca¹, Bryand David Salamanca Briceño¹, Wilman Alonso Pineda Muñoz¹

1. Grupo GENTE, UPTC, Duitama, Colombia
γ. Autor correspondal: ruben.joya@uptc.edu.co

Resumen

En la actualidad la automatización de procesos es parte fundamental de la vida cotidiana debido a que nos permite realizar tareas de una forma más fácil y precisa. Existen diversas formas y herramientas para realizar estos procesos tales como lo son los microcontroladores. En la industria de la repostería una de las labores más monótonas y agotantes es la decoración de galletas, por lo cual se desarrolló un sistema de posicionamiento cartesiano de tres grados de libertad controlado mediante el entorno de desarrollo ofrecido por Arduino que permitiera realizar esta tarea. Para esto se desarrolló un algoritmo con el cual se comandó el sistema para dibujar cuatro figuras geométricas (cuadrado, triángulo, círculo, espiral), realizadas por el control de dos motores paso a paso que comandan el movimiento en el plano horizontal y un servomotor que gobierna la dirección vertical Fig.1., para los cuales se identificó la distancia que se desplazaba el efector final por paso del motor así como las dimensiones del espacio de trabajo que son de 215 pasos en cada eje, es decir. 3,2 centímetros por lado.



Fig.1. Prototipo.

El algoritmo implementado para el desarrollo de cada figura depende de la dificultad de la misma, para todas las figuras el eyector de chocolate, sin importar en qué posición este, partirá desde un origen establecido. Una vez se ubica allí, el servomotor se acciona para que el eyector baje y se ubique sobre la galleta para a continuación hacer el recorrido que formara la figura. Para la



realización del cuadrado de la Fig.2 la cantidad de pasos que gira cada motor depende de las dimensiones que tendrá la figura (por ejemplo 200 pasos), finalmente cuando termine el recorrido el servomotor se activara nuevamente pero en sentido contrario para elevar el eyector. Para las demás figuras, la determinación de la cantidad de pasos que debe girar cada motor es más compleja, debido a que en muchas de las secciones de la figura los ejes se deben desplazar simultáneamente. Por ejemplo, en el círculo para poder calcular los pasos para el control de los motores, este se dividió en secciones de cada 10° como se muestra en la Fig.3; haciendo una ampliación de la primera sección como se muestra en la Fig.4 se observa que la recta en azul forma 5° con respecto a la horizontal y que la recta roja forma 10° con respecto a la del punto anterior (azul). De aquí se puede concluir que entre puntos hay 10° a los que se le deben sumar 5° para que saber el ángulo (β) que forma cada punto con respecto a la horizontal; en la Fig.5 se muestra la relación entre el número de pasos en el eje x y el eje y, y el ángulo β el cual varía en cada sección 10° como se describió anteriormente.

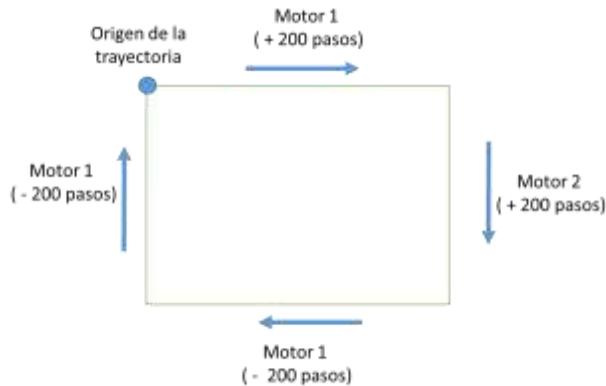


Fig.2. Trayectoria de los motores.

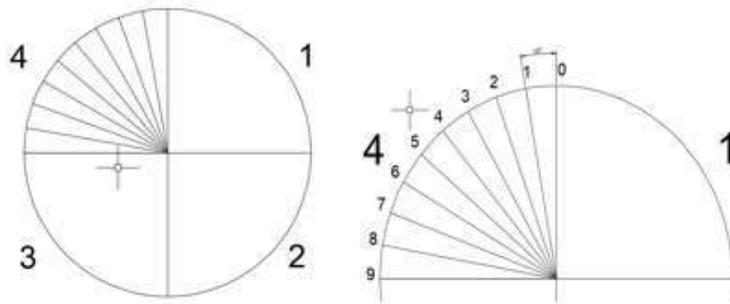


Fig.3. Secciones del círculo.

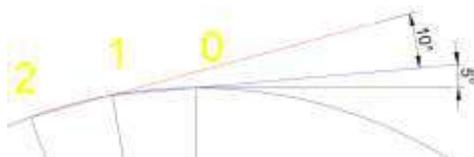


Fig.4. Ampliación de una sección.

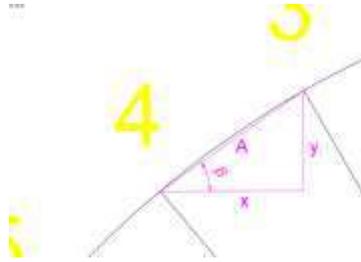


Fig.5. Relaciones entre desplazamiento de los ejes.

En general, los algoritmos realizados para cumplir con esta tarea cumplieron las expectativas en cuanto a la calidad del trazo de la figura y la precisión del mismo, así como una correcta comunicación de los motores con el microcontrolador.

Palabras clave: algoritmo, automatización, control, microcontrolador, posicionamiento,

Abstract

Currently, process automation is a fundamental part of everyday life because it allows us to perform tasks in a more easy and precise way. There are different ways and tools to carry out these processes such as microcontrollers. In the confectionery industry, one of the most monotonous and exhausting task is the decoration of cookies, so that make a Cartesian positioning system with three degrees of freedom can be controlled by the development environment offered by Arduino that would allow this task to be carried out. For this there is an algorithm with which the system can be used to draw four geometric figures (square, triangle, circle, spiral), made by the control of the stepper motors that command the movement in the horizontal plane and a servomotor that governs the vertical direction Fig.1., for which he identified the distance that the end effector traveled by the passage of the motor as well as the dimensions of the workspace of his son of 215 steps in each axis, that is to say. 3.2 centimeters per side.

The algorithm implemented for the development of each figure depends on the difficulty of the same, for all the figures the chocolate ejector, no matter in which position this, will start from an established origin. Once it is located there, the servomotor is activated so that the ejector goes down and is placed on the cookie to then make the route that formed the figure. For the realization of the square in Fig.2 the number of steps that each motor rotates depends on the dimensions that the figure will have (for example 200 steps), finally when the tour ends the servomotor will be activated again but in the opposite direction to raise the ejector. For the other figures, the determination of the number of steps that each motor must turn is more complex, because in many of the sections of the figure the axes must be moved simultaneously. For example, in the circle to be able to calculate the steps for the control of the motors, this was divided in sections of each 10° as it is shown in the Fig.3; making an enlargement of the first section as shown in Fig. 4 shows that the blue line forms 5° with respect to the horizontal and that the red line forms 10° with respect to that of the previous point (blue). From here we can conclude that between points there are 10° to which we must add 5° to know the angle (β) that forms each point with respect to the horizontal; Fig. 5 shows the relationship between the number of steps on the x axis and the y axis, and the angle β which varies in each section 10° as described above.



In general, the algorithms performed to fulfill this task met the expectations regarding the quality of the figure's stroke and its accuracy, as well as the correct communication of the motors with the microcontroller.

Keywords: algorithm, automation, control, microcontroller, positioning.



Sistema Integrado para el Estudio de Potenciales Relacionados a Eventos (SIPRES)

Integrated System for Studying Event Related Potentials (SIPRES)

Daniela López Londoño^{1, γ}, Francia Restrepo de Mejía¹, Belarmino Segura Giraldo¹

1. Departamento, Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, *γ. Autor correspondiente: daniela.lopezl@autonoma.edu.co*

Resumen

Este proyecto de investigación se centra en el desarrollo de un sistema integrado que permita analizar de manera sencilla el comportamiento de la actividad eléctrica cerebral cuando se esté realizando alguna tarea enmarcada en procesos cognitivos y emocionales, utilizando técnicas como los Potenciales Relacionados a Eventos (PRE). El sistema cuenta con tres componentes (Equipos estandarizados) los cuales utilizados de manera sincronizada permiten realizar diversas investigaciones en el área de Neurociencia Cognitiva.

El primer componente, permite obtener la información eléctrica cerebral por medio de un electroencefalógrafo estandarizado (propiedad del laboratorio) mediante la ubicación de electrodos de superficie en el cuero cabelludo utilizando el sistema 10-20.

El segundo componente permite realizar la estimulación auditiva, visual o mixta dependiendo del proceso que se desea evaluar. La programación de dichos estímulos se realiza bajo parámetros o modelos propios para cada investigación; denominados protocolos de estimulación. El diseño de estos estímulos se programa mediante la plataforma de un software especializado para la estimulación llamado *Presentation®*, adherido a este se ajustó una tarjeta de adquisición de *National Instruments* que permite sincronizar los estímulos ya programados como la señal obtenida del EEG.

Para la obtención de los PRE en procesos cognitivos y emocionales, es necesario la construcción de protocolos de estimulación enfocados a una población mayor de 60 años que presentan Deterioro Cognitivo Leve (DCL) y una población control. Dentro de los procesos cognitivo se estudió la actividad eléctrica cerebral ante una tarea de atención y memoria donde el estímulo es presentado con unas características específicas tanto en tiempo, aleatoriedad y tipo de estímulo basado en el *paradigma oddball*. En procesos emocionales se discriminará las diferencias de actividad eléctrica cuando se presentan situaciones (expresión facial) de alegría, tristeza o neutralidad teniendo en cuenta las características requeridas en la duración y tipo de estímulo.

Con el propósito de ofrecer un apoyo al diagnóstico de patologías de forma sistematizada se propone desarrollar el tercer componente, este consiste en una interfaz gráfica implementada en el software *Matlab®* que permite visualizar y analizar PRE de acuerdo con las necesidades requeridas para cada investigación, este debe contener un sistema modular e interactivo que le facilite a los especialistas analizar la información respecto a los canales utilizados en la técnica y



el tipo de estímulo implementado, proceso que a futuro permitirá establecer y generara marcadores biológicos con el sistema SIPRES, a partir de ondas características de cada proceso.

Se dan agradecimientos a la Universidad Autónoma de Manizales y al proyecto de Teleasistencia para el servicio del Deterioro Cognitivo Leve en el departamento de Caldas, por financiar el recurso humano, los insumos, la muestra, facilitar el espacio y las herramientas tecnológicas para la construcción y evaluación del sistema SIPRES.

Palabras clave: Potenciales Relacionados a Eventos, Potencial Evocado Cognitivo, Potencial Evocado Emocional, Protocolo de Estimulación, Sistema de Extracción de Potenciales Relacionados a Eventos, Electroencefalograma.

Abstract

This research project focuses on developing an integrated system that allows a simple analysis of the behavior and brain electrical activity when performing a task within cognitive and emotional processes and by using the technique of Event-Related Potentials (ERPs). This system has three components (standardized equipment) which, if used properly synchronized lead to carry out different research studies within the Cognitive Neuroscience field.

The first component yields to brain electrical information by using a standardized electroencephalograph (owned by the laboratory). This is performed by placing surface electrodes on the scalp with the 10-20 system.

The second component allows auditory, visual or mixed stimulation depending on the processes to be evaluated. Parameters or models specific to each research study allow the programming of such stimuli, which are called stimulation protocols. *Presentation*® which is a specialized software for the stimulation favors the stimuli design. A card of acquisition of *National Instruments* was attached to this software in order to synchronize the stimuli already programmed as the signal obtained from the EEG.

Stimulation protocols focused on a population over 60 years with Mild Cognitive Impairment (MCI) and a control population were designed in order to obtain the ERPs in cognitive and emotional processes. Among these cognitive processes, brain electrical activity was studied in response to an attention and memory task where the stimulus is presented with specific features such as time, randomness and type of stimulus based on the oddball paradigm. With respect to emotional processes, differences in electrical activity were discriminated when situations of joy, sadness or neutrality arise (facial expression) by taking into account the necessary features in the duration and type of stimulus.

The third component is intended to be developed in order to provide support for diagnosing diseases in a systematic way. This consists of a graphical interface implemented in the software *Matlab*® to visualize and analyze ERPs in accordance with the needs required for each research study. It must have a modular and interactive system that allows specialists analyze the information regarding the channels used in the technique, and the type of stimulus implemented. This process will lead to establish and generate biological markers with the SIPRES system from wave characteristics of each process.

Acknowledgments are given to the Autonomia University of Manizales and the Teleassistance project for the Mild Cognitive Impairment service in the department of Caldas for financing human



resources, supplies, sample, and providing facilities and technological tools for developing and evaluating the SIPRES system.

Keywords: Event Related Potentials, Cognitive Evoked Potentials, Emotional Evoked Potentials, Stimulation Protocol, Event Related Potentials Extraction System, Electroencephalogram.



Diseño Geométrico de una Zapata Doble para Cimentación Aplicada en Torres de Transmisión Eléctrica

Double Footing Geometry Design for the Foundation Applied in Transmission Towers

Mauricio Pérez Giraldo^{1, γ}, Jose David Yepes², Hernando Alexander Yepes Tumay³

1. Estudiante de pregrado Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellín, Colombia Email: Maperezgi@unal.edu.co
2. Estudiante de pregrado Ingeniería Física, Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellín, Colombia
3. Grupo de investigación en Ingenierías Aplicadas para la Innovación, la Gestión y el Desarrollo, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia.

γ. Autor corresponsal: maperezgi@unal.edu.co

Resumen

Las torres de transmisión en la actualidad son la base de la distribución tanto de energía eléctrica como de comunicación por cable. Se presenta la geometría utilizada para las fundaciones de las torres de transmisión eléctrica, las cuales en la actualidad usan un sistema de cimentación en zapatas. Se plantea una geometría basada en módulos prefabricados de hormigón los cuales forman una estructura que se llamará cimentación en zapata doble (Figura 1).

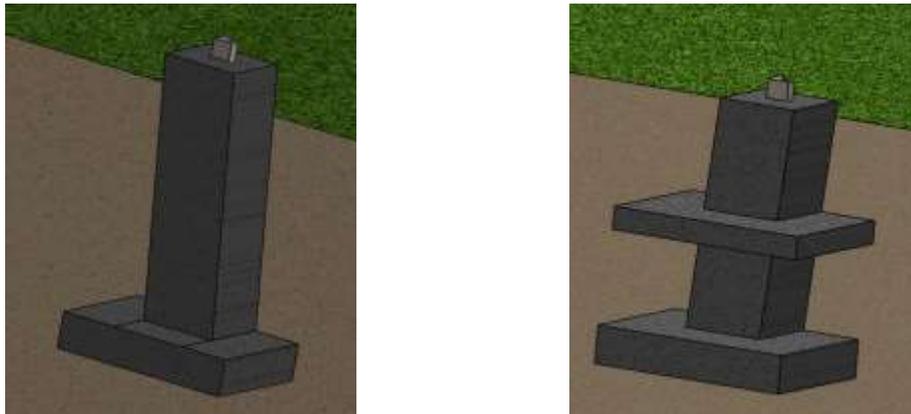


Figura 1 Cimentación de zapata simple (izq), cimentación de zapata doble (der)

Se plantea un modelo físico representado en la Figura 2. Donde se calcularon las cargas para las diferentes zonas de la torre en función de su área, coeficientes de fuerzas y datos experimentales [1]

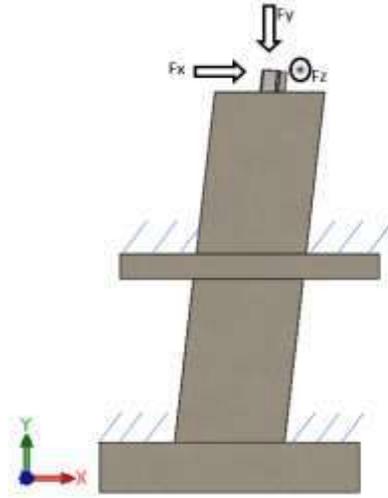


Figura 2 Modelo físico de la geometría propuesta

Se realiza un modelo FEM en ANSYS con las siguientes consideraciones:

- El material es isotrópico lineal.
- El análisis realizado es estático lineal.
- Las cargas de viento que recibe la estructura son en la dirección perpendicular a la que tienen los cables, por lo cual se asocia que tienen solo una componente de acción. A su vez se considera que las fuerzas de viento están actuando de forma puntual y son asociadas con momentos en el punto de interés de la simulación. [1]
- Se considera que las cargas utilizadas se distribuyen de forma uniforme en los cuatro apoyos de la torre por ende en sus cimentaciones, por lo cual el valor a estudiar se divide por cuatro en la simulación.
- Los materiales utilizados en la simulación son: Acero ASTM A36 estructural para la chimenea en el cual va soportada la estructura; junto con hormigón armado.
- Se utiliza el esfuerzo último para el hormigón debido a que es un material considerado frágil, y se utiliza el esfuerzo de fluencia en el acero estructural debido su comportamiento dúctil.
- Se considera una carga distribuida en la región sobresaliente de la chimenea sobre la cimentación.

El modelo da como resultado el esfuerzo de Von Mises (Figura 3) utilizado para comparar con el esfuerzo de fluencia del material. En la Tabla 1 presentamos los resultados encontrados. Los datos de fluencia fueron tomados de la base de datos de ANSYS

Tabla 1 Comparativa resultados y factores de seguridad por Von Mises (Pa), Elaboración propia

Material	Angulo 0°	Angulo 30°	Esfuerzo de Fluencia	Factor seguridad
Acero estructural	1,02x10 ⁸	1,14 x10 ⁸	2,50 x10 ⁸	2,18
Hormigón	2,50 x10 ⁷	2,45 x10 ⁷	4,10 x10 ⁷	1,67

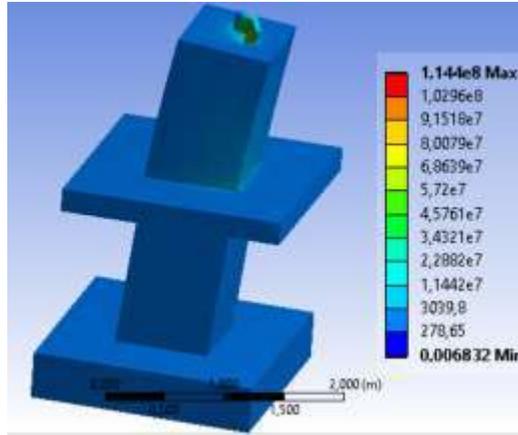


Figura 32 Esfuerzos Von Mises (Pa) en el modelo 30°

Se observa que la estructura de doble zapata logra soportar los esfuerzos a los que es sometido bajo las consideraciones dadas.

Se realiza una comparativa entre las dimensiones de la geometría propuesta y la geometría convencional de zapata simple (figura 4) [2]. Encontrando así que el volumen utilizado en la geometría propuesta es menor a la convencional en aproximadamente un 17%. En la tabla 2 se presentan los valores de volumen en metros cúbicos de las geometrías.

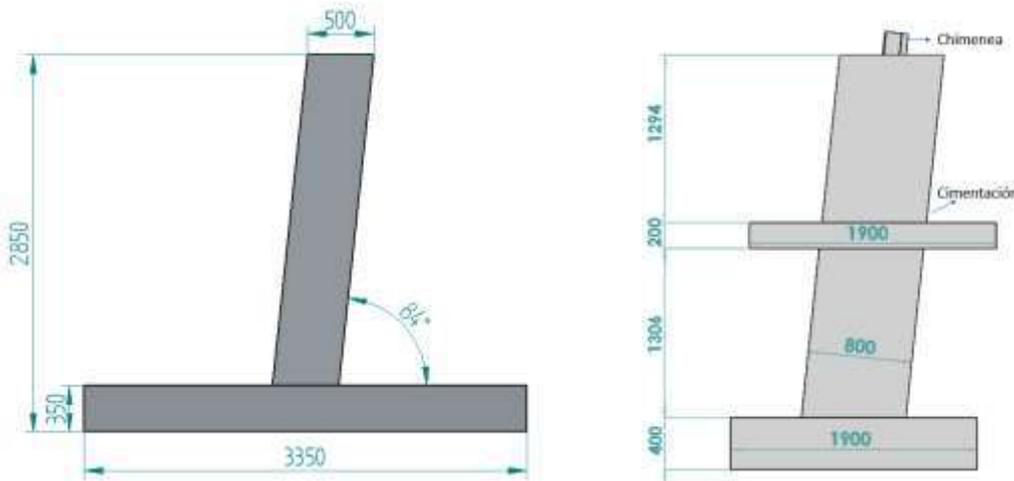


Figura 4 geometría y dimensiones de las cimentaciones: zapata simple (izq), zapata doble (der), dimensiones en mm,

Tabla 2 Comparativa de volúmenes zapata simple y zapata doble en m³,

Zapata simple	Zapata doble
4,55	3,8
Diferencia	0,75



La geometría planteada al igual que la geometría convencional dependen directamente de las condiciones del suelo sobre el cual van a ser construidas, por lo cual las geometrías utilizadas en este trabajo son solo representativas y se recomienda que de ser utilizadas se determinen las condiciones del lugar a construir y se realice un correcto estudio de sus implicaciones sobre las geometrías.

El trabajo realizado se basa solo en el estudio estático de la estructura; para asegurar sus condiciones de operación y determinar si el diseño planteado puede llegar a reemplazar la geometría actualmente utilizada se requiere realizar un análisis de estabilidad al volumen de tierra asociado al sistema, para confirmar el comportamiento que este tiene y si puede aportar la rigidez necesaria para que la geometría planteada pueda funcionar.

Palabras clave: Cimentaciones, diseño computacional, zapatas, torres, geometría, eléctrica.

Abstract

The transmission towers are currently the basis of the distribution of both electrical power and cable communication. The geometry used for the foundations of the electrical transmission towers is presented, which currently use a footing foundation system. A geometry is proposed based on prefabricated concrete modules which form a structure that will be called a double-footing foundation (figure 1).

Is presented a physical model that is represented in Figure 2. Where the loads for the different zones of the tower were calculated according to their area, a coefficient of force and experimental data [1]

An FEM model is performed in ANSYS with the following considerations:

- The material is linear isotropic.
- The analysis performed is linear static.
- The wind loads over the structure are in perpendicular direction to the cables, which is why they have only one component of action. In turn, it is considered that the wind forces are acting in a single point and are associated with moments in the point of interest of the simulation. [1]
- It is considered that the loads used are distributed uniformly in the four supports of the tower and therefore in their foundations, so the value to study is divided by four in the simulation.
- The materials used in the simulation are: ASTM A36 structural steel for the stub on which the structure is supported; together with reinforced concrete.
- The last stress for the concrete is used because it is a material considered fragile, and the yield stress in the structural steel is used due to its ductile behavior.
- It is considered a distributed load in the projecting region of the stub on the foundation.

The model results in the Von Mises stress (Figure 3) used to compare with the yield stress of the material. In Table 1 we present the results found. The yield stress data was taken from the ANSYS database.



It is observed that the double-footing structure manages to withstand the stress to which it is subjected under the given considerations.

A comparison is made between the dimensions of the proposed geometry and the conventional simple-footing geometry (figure 4) [2]. Finding that the volume used in the proposed geometry is less than the conventional one by approximately 17%. Table 2 shows the volume values in cubic meters of the geometries.

The proposed geometry as well that the conventional geometry directly depends on the soil conditions on which they are going to be built, for which the geometries used in this work are only representative and it is recommended that if they are used, the conditions of the place are determined and a specific study of their implications over the geometry should be realized.

The work is based only on the static study of the structure; To ensure its operating conditions and determine if the proposed design can replace the geometry currently used, it is necessary to perform a stability analysis of the volume of earth associated with the system, to confirm its behavior and if it can provide the necessary rigidity that the proposed geometry needs to work.

Keywords: Foundations, computational design, footing, towers, geometry, electric

Referencias

- [1] C. Alzate Acevedo, “Diseño Conceptual de torres de transmisión de energía utilizando el método de optimización topológica considerando análisis tridimensional y cargas producidas por cables y viento,” p. 189, 2016.
- [2] V. Guerrero Flores, N. Melchor García, “Normalización de cimentaciones superficiales para torres de transmisión”, p. 14, XII congreso nacional de ingeniería estructural, Morelia, Michoacán, México, 1999



Plataforma de Prueba de Vuelo y Estabilización de Drones “Giros”

Drones Flight and Stabilization Test Platform “Giros”

Mariana Cardona Torres^{1,γ}, Luis Ignacio Arboleda Serna², Sergio Iván Zapata Torres¹, Adonái Zapata Gordon¹.

1. Programa de ingeniería mecatrónica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia
 2. Programa de ingeniería mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia
- γ. Autor correspondiente: niko@utp.edu.co*

Resumen

El presente trabajo consiste en el diseño y manufactura de una plataforma de prueba de vuelo para aeronaves multi-rotor la cual posibilite la rotación libre del dispositivo alrededor de los ejes alabeo (*roll*) cabeceo (*pitch*) y guiñada (*yaw*). Debido al crecimiento continuo de usuarios de aeronaves no tripuladas (UAV) en campos comerciales, recreativos y laborales sumado al hecho de la amplia oferta que hay en este tipo de tecnologías se suelen encontrar diversos problemas relacionados con el control de vuelo y la estabilización del mismo. Con la construcción del proyecto “Giros” se estudiará el proceso de control de vuelo en estas aeronaves de despegue vertical para así realizar mejoras, específicamente en la calibración, estabilidad y maniobrabilidad del equipo buscando reducir los riesgos de un vuelo a campo abierto, inspirado en el proyecto “Diseño, desarrollo y construcción de bancos de pruebas para un UAV multi-rotor” de la Universidad de la Rioja ¹.



Figura 1. Prototipo de pruebas (Giroscopio)

Para el desarrollo del proyecto es aplicado el principio de rotación en un giroscopio, este cuenta con un mecanismo que permite la rotación en los 3 ejes de control aeronáutico; Alabeo (Roll), Cabeceo (Pitch) y Guiñada (Yaw). El mecanismo, apreciable en la figura 1, consta primero de una estructura fija cuya medida entre paredes internas es de 990 mm, luego dos circunferencias concéntricas elaboradas con láminas de 3mm y con diámetros internos de 920 mm y 850mm; finalmente un eje de 1cm de diámetro que sostiene la aeronave en el centro del giroscopio; las diferentes partes mencionadas están unidas secuencialmente a través de juntas rotativas. Además esta plataforma está diseñada para albergar en su interior un hexacóptero F550 cuya distancia entre rotores es de 550 mm y es equipado típicamente con hélices de 10 pulgadas de longitud, también se integrará una unidad de medición inercial (MPU6050) la cual dará utilidad en los procesos calibración y pruebas de precisión en los multi-rotor, este elemento se instaura con el fin de arrojar



información en tiempo real respecto al movimiento de la maquina facilitando el análisis y ajuste de los sistemas de vuelo.

Se busca integrar en primer lugar materiales livianos y resistentes para los elementos móviles por consiguiente se usaron láminas delgadas de aluminio para los aros; en segundo lugar la estructura fija debe ser pesada y rígida para que no sea afectado por el movimiento durante las pruebas, para lo cual se usó un perfil hueco de acero de 3cm x 4,5cm. Buscando obtener los mejores resultados estructurales y económicos sin sacrificar la calidad el proyecto “Giroscopio” consta de distintos procesos de diseño y manufactura para los componentes utilizados en el montaje del prototipo, aplicando herramientas de tipo CAD en el desarrollo de los croquis elementales, consecuentemente se usaron máquinas CNC para la impresión de componentes de acople como los mostrados en la figura 2 y soldadura por arco eléctrico en las estructuras metálicas reduciendo el tiempo de desarrollo, minimizando costos y facilitando los procesos de manufactura de dichos componentes gracias al trabajo en conjunto entre negocios de la localidad y laboratorios de la institución.



Figura 2. Piezas de acople obtenidas por impresión 3D

El fin principal de este proyecto es poder desarrollar un equipo de precisión útil en la calibración del control de aeronaves UAV multi-rotor. En segundo plano brindar un equipo funcional para las investigaciones, proyectos y extensiones pedagógicas que pueden llegar a requerir la implementación de esta tecnología.

Palabras clave: Alabeo, cabeceo, calibración, estabilidad, giroscopio, guiñada.

Abstract

The project presented through this document consists in the design and manufacture of a flight test platform for multi-rotor aircraft that allows the free rotation around the roll, pitch and yaw axis. Given the continuous growth of unmanned aircraft (UAV) users in the commercial, recreational and labor fields, in addition to the research expansion that there is in this type of technologies it is common to find flight control and stabilization obstacles. This project will serve to study the performance of the flight control system in order to improve it, specially calibration, stability and maneuverability, looking forward to reduce the risks of a flight on an open field, inspired in the project “Design, development and construction of devices for UAV multi-rotor tests” of the University of La Rioja.

For the development of the project, the gyroscope operation principle is applied with a mechanism that allows simulating the rotation of the three control axis in aeronautics: Roll, Pitch and Yaw. The mechanism, shown in figure 1, is composed first of a fixed structure whose distance between inner sides is 990 mm, then there are two concentric circumferences whose internal diameters are 920 mm and 850 mm, finally there is an axis of 1cm diameter that holds the quadcopter in place. The elements mentioned are sequentially linked through rotary joints, furthermore, the platform was



designed to house an UAV F550 whose distance between rotors is 550 mm and is typically equipped with 10 inches long propellers. The platform will also be integrated with an inertial measurement unit (MPU6050) which will be used for calibration and new precision tests with multi-rotor aircraft; the electronic system will yield information in real time in order to facilitate the analysis and correction of the UAV's flight system.

For the manufacture of the project, it is sought to use lightweight materials for the moving parts, therefore the circumferences were built with thin aluminum sheets; contrary to the base structure that must be heavy and rigid for the movement not to affect the test results, so it was used a 3cm x 4.5 hollow steel profile. In order to get the best structural results minimizing the cost without sacrificing the project's quality different design and manufacture process were integrated, employing CAD tools to create sketches of the parts, CNC machine to print the pieces for the joints as the ones shown in the figure 2 and finally electric arc welding for the metallic structure. Thanks to the collective work between specialized local workshops and institution's laboratories to facilitate the manufacture process, the development time and cost were reduced.

The purpose of this effort is to have a control calibration system for multi-rotor UAVs because firstly it is the basis for the correct movement in an aircraft and second to leave a functional equipment for research, developments and pedagogical extensions that can be applied in future projects.

Keywords: Calibration, gyroscope, yaw, pitch, roll, stability.

Referencias

- [1] J. Visa Vidal, Diseño, desarrollo y construcción de bancos de pruebas para un UAV multi-rotor. Universidad de la Rioja, Julio 2016, pp. 47-49, 119 – 125.
- [2] D.F.A Anderson y S. Eberhardt, "Understanding flight", 2 ed, McGraw Hill, p. 293.
- [3] D. Thapliyal, V.D. Juyal, K.V. Singh, L T Humtsoe, T. Melong, "Study and Anallysis of MEMS and NEMS based gyroscope". Proceedings of the second International Conference on Inventive System and Control – IEEE Xplore Compliant, pp. 1320-1323.
- [4] DJI, "FlameWheel 550 User Manual"



Interacción con Entornos Hápticos de 1GDL para el Diseño de Sistemas de Control Bilateral de Robots

Interaction with 1FDG Haptical Environments for the Design of Robots Bilateral Control Systems

María Luisa Pinto Salamanca^{1, γ}, Bryand David Salamanca Briceño¹, Rubén Olmedo Joya Espinosa¹, Wilman Alonso Pineda Muñoz¹, Leydi Julieta Cardenas Flechas¹

1. Escuela de Ingeniería electromecánica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Duitama, Colombia

γ. Autor corresponsal: marialuisa.pinto@uptc.edu.co

Resumen

Las interfaces hápticas permiten la realimentación de señales táctiles para transmitir sensaciones de contacto a un operador de un dispositivo maestro en un sistema de teleoperación de robots. Las aplicaciones de estos sistemas pueden incluir simuladores para entrenamiento médico a partir de herramientas para la planeación de procedimientos quirúrgicos [1]; en entornos de educación y enseñanza [2]; control de vehículos aéreos [3] o en otros que por consideraciones de riesgo o acceso, no puede intervenir directamente un ser humano sino a través del control a distancia de un dispositivo háptico.

La teleoperación remota permite que una persona a través de un dispositivo maestro, intervenga en las acciones de un robot esclavo desde un lugar separado. Lo cual implica una realimentación de información sensorial para que el usuario tome las decisiones sobre como guiar al robot. El trabajo presentado incluye los resultados de la interacción con un dispositivo háptico de 1GDL bajo la orientación del proyecto hapkit [4] ofrecido por la Universidad de Stanford. Mediante un renderizado háptico y gráfico, una arquitectura de control con ArduinoUNO™ y un canal de comunicaciones serial, se interactúan en entornos de realidad virtual creados con software libre y se evalúan las estrategias de control bilateral posición-posición y fuerza-posición en mecanismos de 1GDL que simulan el comportamiento de un robot esclavo. La interacción con los elementos del sistema de teleoperación permiten evaluar su desempeño en términos de tiempo de retardo, transparencia y estabilidad.

La interfaz háptica ha sido construida bajo la guía hapkit 3.0, con las adaptaciones de impresión 3D, reemplazo de motor, sensor de posición y acoples, por elementos disponibles en el mercado local, con el objeto de garantizar acceso a los dispositivos por parte de estudiantes de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, para comprender los conceptos de control bilateral de forma práctica, rápida y a un bajo costo..

Palabras clave: háptica, telerobótica, control bilateral, hapkit

Abstract

The haptic interfaces allow the feedback of tactile signals to transmit contact sensations to an operator of a master device in a robot teleoperation system. The applications of these systems can include simulators for medical training from tools for the planning of surgical procedures [1]; in education and teaching environments [2]; control of aerial vehicles [3] or in others that due to



considerations of risk or access, a human being can not intervene directly but through the remote control of a haptic device.

Remote teleoperation allows a person to intervene in the actions of a slave robot from a separate location through a master device. This implies a feedback of sensory information for the user to make the decisions of the robot's guidance. In the presented work, the results of the interaction with a 1FDG haptic device are included under the guidance of the hapkit project [4] offered by Stanford University. Using a haptic and graphic rendering, a control architecture with ArduinoUNO™ and a serial communications channel, users interact in virtual reality environments created with free software and bilateral position-position and strength-position control strategies in mechanisms are evaluated. of 1GDL that simulate the behavior of a slave robot. The interaction with the elements of the teleoperation system allows to evaluate its performance in terms of delay time, transparency and stability.

The haptic interface has been built under the hapkit 3.0 guide, with adaptations of 3D printing, replacement of motor, position sensor and couplings, by elements available in the local market, in order to guarantee access to the devices by students of Electromechanical Engineering of the Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, to understand the concepts of bilateral control in a practical, fast and at a low cost.

Keywords: haptics, telerobotics, bilateral control, hapkit

Referencias

- [1] T. R. Coles, D. Meglan and N. W. John, "The Role of Haptics in Medical Training Simulators: A Survey of the State of the Art," in IEEE Transactions on Haptics, vol. 4, no. 1, pp. 51-66, January-March 2011.
- [2] T. Yuksel et al., "Exploration of affordances of visuo-haptic simulations to learn the concept of friction," 2017 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE), Indianapolis, IN, 2017, pp. 1-9.
- [3] M. Abdullah, M. Kim, W. Hassan, Y. Kuroda and S. Jeon, "HapticDrone: An encountered-type kinesthetic haptic interface with controllable force feedback: Example of stiffness and weight rendering," 2018 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), San Francisco, CA, 2018, pp. 334-339.
- [4] M. O. Martinez et al., "3-D printed haptic devices for educational applications," 2016 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), Philadelphia, PA, 2016, pp. 126-133.



Rendimiento Energético de un Horno Equipado con Quemadores Regenerativos Bajo el Régimen de Combustión Sin Llama

Energy Performance of a Furnace with Regenerative Burner Under Flameless Combustion Regime

Hernando Alexander Yepes Tumay¹, Carlos Ernesto Arrieta Gonzales² Andrés Adolfo Amell Arrieta^{3, γ}

1. Departamento de Ingeniería Mecánica, Grupo de investigación en Ingenierías Aplicadas para la Innovación, la Gestión y el Desarrollo (INGAP), Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia

2. Facultad de Ingeniería, Fundación Universitaria del Área Andina, Valledupar, Colombia.

3. Facultad de Ingeniería, Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía (GASURE), Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

γ. Autor correspondiente: andres.amell@udea.edu.co

Resumen

La creciente demanda energética y el aumento de las emisiones contaminantes son una grave problemática en la actualidad. El aumento de la eficiencia es una de las principales alternativas para reducir tanto el consumo de combustibles, como la cantidad de contaminantes. En este sentido el régimen de combustión sin llama con quemadores regenerativos se presenta como una tecnología que permite de forma simultánea alcanzar estas características. En el presente estudio se llevó a cabo la evaluación energética de forma experimental de un horno operando a 25 kW en el régimen de combustión sin llama, usando gas natural como combustible. De forma adicional se realizó una simulación CFD para evaluar la capacidad de predicción de los modelos seleccionados. Los resultados obtenidos del balance de energía muestran que la eficiencia térmica del horno bajo el mencionado régimen supera en un 10% adicional, la alcanzada en combustión convencional, además de obtener niveles de emisiones sumamente bajos. Los modelos seleccionados reproducen las tendencias generales del régimen sin embargo subestiman las tasas de reacción dentro del proceso de combustión del CH₄

Palabras clave: Combustión sin llama; CFD; Gas Natural; Eficiencia; Rendimiento energético.

Abstract

The growing energy demand and the increase in the pollutant emission are serious issues currently. Efficiency increase is one of the principal alternatives to reduce the fuel consumption and decrease the amount of contaminants. In this sense the flameless combustion regime combine with regenerative burners is a technology that allows obtain both. In the present study an energy evaluation of a furnace at 25 kW under flameless combustion regime with natural gas as fuel was carried out. Additionally a CFD simulation was performed in order to evaluate the capacity of the selected models of predict the experimental results. The results of energy balance shows that the thermal efficiency overcomes in more than 10% the values obtained under conventional combustion, besides achieve very low emission levels. Selected models reproduce accurately the



general behaviours of flameless combustion regime, however underestimate the reaction rates at the combustion of CH₄

Keywords: Flameless, CFD, Natural Gas, Efficiency, Energy Performance.

Referencias

- [1] 2016 IEA, *International Energy Outlook 2016*. U.S. Department of Energy, 2016.
- [2] M. Höök and X. Tang, "Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change-A review," *Energy Policy*, vol. 52, pp. 797–809, Jan. 2013.
- [3] E. A. Abdelaziz, R. Saidur, and S. Mekhilef, "A review on energy saving strategies in industrial sector," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 1, pp. 150–168, Jan. 2011.
- [4] H. Dunkelberg, J. Wagner, C. Hannen, B. A. Schlüter, L. Phan, J. Hesselbach, and C.-X. Lin, "Optimization of the energy supply in the plastics industry to reduce the primary energy demand," *J. Clean. Prod.*, vol. 192, pp. 790–800, Aug. 2018.
- [5] S. Zhou, Y. Wang, Z. Yuan, and X. Ou, "Peak energy consumption and CO₂ emissions in China's industrial sector," *Energy Strateg. Rev.*, vol. 20, pp. 113–123, Apr. 2018.
- [6] F. Rehermann and M. Pablo-Romero, "Economic growth and transport energy consumption in the Latin American and Caribbean countries," *Energy Policy*, vol. 122, pp. 518–527, Nov. 2018.
- [7] A. Shahsavari and M. Akbari, "Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 90, pp. 275–291, Jul. 2018.
- [8] A. Cavaliere and M. De Joannon, "Mild Combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 30, pp. 329–366, 2004.
- [9] J. Wüning, "Flameless oxidation to reduce thermal no-formation," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 23, no. 1, pp. 81–94, 1997.
- [10] A. Amell, L. Rubio, Y. Cadavid, and C. Echeverri, "Informe final del proyecto: Análisis de las necesidades tecnológicas para la mitigación del cambio climático en el sector industrial colombiano." Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2013.
- [11] W. Yang and W. Blasiak, "Numerical simulation of properties of a LPG flame with high-temperature air," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 44, no. 10, pp. 973–985, 2005.
- [12] P. Li, F. Wang, J. Mi, B. B. Dally, and Z. Mei, "MILD combustion under different premixing patterns and characteristics of the reaction regime," *Energy and Fuels*, vol. 28, no. 3, pp. 2211–2226, 2014.
- [13] Y. Tu, H. Liu, S. Chen, Z. Liu, H. Zhao, and C. Zheng, "Effects of furnace chamber shape on the MILD combustion of natural gas," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 76, no. 0, pp. 64–75, 2015.
- [14] Y. Tu, K. Su, H. Liu, Z. Wang, Y. Xie, C. Zheng, and W. Li, "MILD combustion of natural gas using low preheating temperature air in an industrial furnace," *Fuel Process. Technol.*, vol. 156, pp. 72–81, Feb. 2017.



- [15] B. Herrera, “Desarrollo y Evaluación de una Cámara de Combustión sin Llama,” *Departamento de Ingeniería Mecánica*, vol. Maestría e. Universidad de Antioquia, 2009.
- [16] C. Sepúlveda and A. A. Amell, “Desarrollo y evaluación de un quemador auto regenerativo para la combustión sin llama del gas natural.” Universidad de Antioquia, 2009.
- [17] C. Galletti, A. Parente, M. Derudi, R. Rota, and L. Tognotti, “Numerical and experimental analysis of NO emissions from a lab-scale burner fed with hydrogen-enriched fuels and operating in MILD combustion,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 19, pp. 8339–8351, 2009.
- [18] A. Parente, C. Galletti, and L. Tognotti, “Effect of the combustion model and kinetic mechanism on the MILD combustion in an industrial burner fed with hydrogen enriched fuels,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 24, pp. 7553–7564, 2008.
- [19] L. Wang, Z. Liu, S. Chen, and C. Zheng, “Comparison of different global combustion mechanisms under hot and diluted oxidation conditions,” *Combust. Sci. Technol.*, vol. 184, no. 2, pp. 259–276, 2012.
- [20] S. Chen and C. Zheng, “Counterflow diffusion flame of hydrogen-enriched biogas under MILD oxy-fuel condition,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 23, pp. 15403–15413, 2011.
- [21] A. F. Colorado, B. A. Herrera, and A. A. Amell, “Performance of a Flameless combustion furnace using biogas and natural gas,” *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 7, pp. 2443–2449, 2010.



Caracterización Climatológica para la Implementación de Generadores Eólicos por Medio de Estación Meteorológica

Climatological Characterization for the Implementation of Wind Generators by Means of Weather Station

Franklin Giovanni Bastidas_Cuya^{1,γ}, Angie Guevara-Muñoz¹, Mateo del Gallego-Rico¹, Diego Andrés Hincapié-Zuluaga¹, Aldemar Hernandez-Gallego², Iván Salazar².

1. Antioquia, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia.
 2. Antioquia, Institución Universitaria Salazar y Herrera, Medellín, Colombia.
- γ. Autor correspondal: franklinbastidas220172@correo.itm.edu.co*

Resumen

La energía eléctrica puede transformarse a partir de diferentes fuentes, que a su vez se clasifican como Renovables y no Renovables, el uso de fuentes de energía no renovables consume diferentes recursos naturales, como los combustibles fósiles, tales que al ser extraídos producen residuos que contaminan el suelo y agua, asimismo de generar gases de efecto invernadero, los cuales están relacionados con el calentamiento global y/o cambio climático.

Los recursos naturales son agotables y la demanda energética aumenta por el incremento de la población e industrias de producción, por este motivo las energías renovables ofrecen una solución a esta demanda, un ejemplo claro son los generadores eólicos los cuales aprovechan la energía cinética del viento para transformarla en energía eléctrica, además de no producir algún tipo de contaminación ni residuos y a su vez se considera uno de los sistemas de generación de energía más limpios actualmente. Sin embargo, no todas las zonas tienen las características ambientales adecuadas para que el funcionamiento de las turbinas eólicas sea eficiente, por esta razón, es necesario hacer un estudio que determine la viabilidad de la instalación de las turbinas eólicas, para esto es necesario realizar un muestreo de las condiciones meteorológicas de las zonas de interés, y a continuación hacer un adecuado tratamiento de los datos obtenidos y así determinar cuáles zonas poseen mayor potencial eólico. El objetivo de este trabajo es caracterizar una zona por medio una estación meteorológica para determinar la viabilidad de implementación de generadores eólicos, además visualizar en una página web las condiciones meteorológicas en tiempo real de dicho lugar.

Para la caracterización meteorológica de zona y su despliegue de información en una aplicación web, se usa una estación meteorológica prediseñada por la empresa Acurite® que obtiene a partir de tres sensores los datos climáticos como: humedad relativa, temperatura y velocidad del viento, además se utiliza un ordenador de placa reducida Raspberry pi 3 modelo B como controlador, integrando el sistema operativo Raspbian en el cual se elaboran los códigos de programación en Python para la adquisición de datos de los sensores de la estación Acurite® en los pines GPIO(General Purpose Input/Output) del Raspberry, y para la configuración de la base de datos Firebase de Google donde se almacena los datos sensados. La transmisión de estos datos se efectúa por medio de conexión a internet con un módulo de telefonía móvil que permite enviar los datos por la red 2G cada 10 segundos a la base de datos Firebase, por último, se desarrolla una página web con Flask en el que se comunica con la base de datos y posteriormente realiza una visualización gráfica de los datos sensados.



Se concluye que con la metodología empleada se facilita el procesamiento de los datos almacenados que permiten determinar si es factible la implementación de turbinas eólicas en un lugar específico, además el almacenamiento de los datos facilitó los cálculos estadísticos, como los valores máximos, mínimos y medios de las variables de temperatura, humedad y velocidad del viento, además de representarlos gratuita y fácilmente en la página web, igualmente, la transmisión de datos por red móvil garantiza un mayor número de lugares accesibles para la caracterización de las zonas, aumentando las posibilidades de encontrar lugares que cumplan con las condiciones de funcionamiento de los generadores eólicos.

Palabras clave: GPIO, Firebase, Flask, datos móviles, muestreo, generador.

Abstract

The electrical energy can transformation from the sources different, that is why the classification is how renewable and not renewable, the used the energy sources not renewable consume the different the naturals resources, how fuels fossil, such that when extracted they produce waste that contamination the water and floor, likewise the generate effect Greenhouse gases, that is why the relation with the global warming or the climate changes.

The naturals resources are exhaustible and energy demand increases due to the increase the population the production of industries, for this reason the renewables energy offer a solution to this demand, a clear example are the wind generator which take advantage of the kinetic energy the wind for the transformation in electrical energy, also the not produced some kind of pollution or waste and, in turn, is considered an of the cleanest energy generation systems at actuality. However, not all zones have the appropriate environmental characteristics for the efficient operation of wind turbines, for this reason, it is necessary to carry out a study to determine the feasibility of installing wind turbines, so it is necessary to carry out a sampling of The meteorological conditions of the areas of interest, and then perform an adequate treatment of the data obtained and thus determine which zones have the greatest wind potential. The objective of this work is to characterize a zone through a meteorological station to determine the viability of the implementation of wind generators, in addition to displaying on a web page the weather conditions in real time of that place.

For the meteorological characterization of the area and its display of information in a web application, a weather station is used, pre-designed by Acurite, which obtains three climatic data, such as: relative humidity, temperature and wind speed. uses a reduced-board computer Raspberry pi 3 model B as controller, integrating the Raspbian operating system in which the programming codes are elaborated in Python to acquire data from Acurite station sensors on the pins GPIO (General Purpose Input/Output) the Raspberry, and for the configuration of the Google Firebase database where the detected data is stored. The transmission of this data is done through an Internet connection with a mobile phone module that allows sending data through the 2G network every 10 seconds to the Firebase database; finally, a web page is developed with Flask in which it communicates with the database and then makes a graphic display of the sense data.

Keywords: GPIO, Firebase, Flask, mobile data, sampling, generator.



Diseño de un Sistema Robótico Teleoperado Usando una Interfaz sin Contacto

Design of a Teleoperated Robotic System Using a Contactless Interface

Ruth E. Cano^{1, γ}, Juan C. Alarcón¹, José I. García¹

1. Grupo Interdisciplinario de Innovación Biotecnológica, Escuela de Ingeniería Mecánica,
Universidad del Valle, Cali, Valle, Colombia

γ. Autor correspondiente: ruth.cano@correounivalle.edu.co

Resumen

Considerando la necesidad de mejorar la seguridad del operador en entornos peligrosos, es recomendable adaptar una tecnología que permita el manejo de materiales peligrosos por parte de usuarios ubicados en un lugar diferente. Sin embargo, una implementación efectiva de este tipo de solución requiere la definición de un procedimiento que integre adecuadamente las teorías y herramientas. Por lo tanto, este trabajo se centró en la definición de una arquitectura maestro-esclavo, donde un sistema de manipulador esclavo que integra una mano robótica se controlaba con una serie de comandos enviados por un maestro y se basaba en una aplicación de captura de movimiento con dispositivo sin contacto.

Palabras clave: Entornos peligrosos, sistema manipulador, captura de movimiento sin contacto.

Abstract

Considering the need for improved operator safety in hazardous environments, it is advisable to adapt a technology that allows the handling of hazardous materials by users located in a different place. However, an effective implementation of this type of solution requires the definition of a procedure that properly integrates theories and tools. Thus, this work focused on the definition of a master-slave architecture, where a slave manipulator system that integrates a robotic hand was controlled with a series of commands sending by a master and it was based in a motion capture application with non-contact device.

Keywords: Hazardous environments, manipulator system, non-contact motion capture.

Referencias

- [1] Silvers, K. L., Burghard, B. J., Skorpik, J. R., & Clark, D. A., Implementation of an electronic media security system. In Measurement Systems for Homeland Security, Contraband Detection and Personal Safety Workshop, 2005.(IMS 2005) Proceedings of the 2005 IEEE International Workshop on (pp. 35-41). IEEE.
- [2] Frey, T. . Hi, I'm a Robot and I'm Here to Take Your Job. Journal of environmental health, 76(2), 46, 2013.
- [3] Faisal, M., Mathkour, H., & Alsulaiman, M. (2015, February). Smart mobile robot for security of low visibility environment. In Information Technology: Towards New Smart World (NSITNSW), 2015 5th National Symposium on (pp. 1-6). IEEE.



- [4] Gaviria L. ¿Qué es Seguridad Industrial? [En línea]. Disponible en: <<http://saludocupacional.gaventerprise.us/blog/que-es-seguridad-industrial/>>. [Citado: 12-Dic-2013].
- [5] Cox, D. J. (2002). Mock-up of hazardous material handling tasks using a dual-arm robotic system. In Automation Congress, 2002 Proceedings of the 5th Biannual World (Vol. 14, pp. 527-532). IEEE.
- [6] Hapiro, F. C. (1983). Nuclear Danger On the Highways. Nation, 236(24), 763-765.
- [7] GEENPEACE. ¿Qué pasó en Chernobyl?. [En línea]. Disponible en: <<http://www.greenpeace.org/colombia/es/campanas/nuclear/Chernobyl-Nunca-Mas/Que-paso-en-Chernobyl/>>. [Citado: 12-Dic-2013].
- [8] Diario de león. Un artificiero y un policía mueren por desactivar una bomba al oeste de Bagdad. [En línea]. Disponible en: <http://www.diariodeleon.es/noticias/internacional/artificiero-policia-mueren-desactivar-bomba-oeste-bagdad_568306.html>. [Citado: 18-Dic-2013].
- [9] TERRA TV. Impactante registro: policía muere desactivando bomba en Nigeria. [En línea]. Disponible en: <<http://noticias.terra.cl/mundo/videos/impactante-registro-policia-muere-desactivando-bomba-en-nigeria,373414.html>> [Citado: 18-Dic-2013].
- [10] Canal RCN. Muere policía antiexplosivos cuando desactivaba bomba en Ibagué. [En línea]. Disponible en: http://www.canalrcnmsn.com/noticias/muere_polic%AD_antiexplosivos_cuando_desactivaba_bomba_en_ibagu%AD. [Citado: 18-Dic-2013].
- [11] Palastanga N., Field D., Soames R. Anatomía y movimiento humano. Estructura y funcionamiento. 1 ed. Pidotribo, 2007. Pág. 191, 192, 193. ISBN: 9788480195003. [Citado: 5-Mar-2014].
- [12] Tafadycursos. Amplitud de movimiento. [En línea]. Disponible en: <http://www.tafadycursos.com/load/cuerpo_humano/anatomia/amplitud_movimiento/116-1-0-1030>. [Citado: 5-Mar-2014].
- [13] Denso robotics. VS Series VS - 060 Spec. [En línea]. Disponible en: <<http://densorobotics.com/products/vs-050-060/spec>> [Citado 20-Mar-2014].
- [14] SLSA 3D. Mechanical hand. [En línea]. Disponible en: <http://slsa.3dn.ru/load/mechanical_hand/1-1-0-1#comments>. [Citado 20-Mar-2014].
- [15] Leap motion TECHNOLOGY [En línea]. Disponible en: <<http://www.typeter.com/2015/02/leap-motion-technology.html>> [Citado 18-May-2015].
- [16] Xbee devices [En línea] Disponible en: <http://xbee.cl/xbee-pro-50mw-wire-antena/>. [Citado 25-May-2015]
- [17] Ollero B., Aníbal. Robótica: Manipuladores y robots móviles. 1 ed. España. Barcelona. Marcombo, 2001. Pág. 5,16-26, 46,54, 64, 74, 79. ISBN: 84-267-1313-0. [Citado 18-May-2015].



- [18] Motion Anaysis [En línea]. Disponible en <http://www.solidworks.es/sw/products/simulation/motion-analysis.htm>. [Citado 25-May-2015]
- [19] Servomotores [En línea] Disponible en: <https://www.festo.com/cat/es-co_co/products__64394> [Citado 25-May-2015]
- [20] Nema Size 8 [En línea] Disponible en: <<http://www.linengineering.com/stepper-motors/208.aspx>> [Citado 25-May-2015]
- [21] Guna J., Jakus G., Pogačnik M., Tomažič S. and Sodnik J. An Analysis of the Precision and Reliability of the Leap Motion
- [22] Sensor and Its Suitability for Static and Dynamic Tracking. *Sensors* 2014, 14, 3702-3720; doi:10.3390/s140203702 [PDF]. [Citado 25-May-2015]



Estudio Computacional de Películas Delgadas Magnéticas Policristalinas a Escala Atomística

A Computational Study of Magnetic Polycrystalline Films at atomistic Scale

Jose Dario Agudelo-Giraldo^{1,2,γ}, Oscar Moscoso Londoño¹, Elisabeth Restrepo-Parra²

1. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Manizales. Manizales, Colombia
2. PCM Computational Applications, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, Manizales, Colombia

γ. Autor correspondiente: josed.agudelog@autonoma.edu.co

Resumen

Las nuevas aplicaciones tecnológicas en áreas tales como componentes inductivos, sensores, antenas flexibles y dispositivos de núcleos magnéticos utilizados para confinar y guiar campos magnéticos, se centran en el desarrollo de nuevos materiales magnéticos nanocristalinos. A esta escala y bajo una temperatura constante por debajo de la temperatura crítica, los granos tienden a un estado de monodominio donde el campo coercitivo disminuye fuertemente cuando el tamaño del grano disminuye [1]. En particular, a diferencia de las nanopartículas, el campo coercitivo no decae completamente a cero en los materiales nanocristalinos debido a que los límites de grano permiten algo de conectividad entre ellos. Entonces, la física de los límites de grano se vuelve muy notable por la fenomenología intrigante. Se han propuesto diferentes modelos para cuantificar la interacción de intercambio entre granos [1][2]. Los modelos habían explicado algunas propiedades a escala de micro-metro. Sin embargo, se necesitan nuevos modelos a una escala más reducida en la que la relación entre los átomos en los límites del grano y los átomos en el core aumentan considerablemente. Un tratamiento atomístico se presenta debido a la superficie y los límites de grano generan una nueva fenomenología. Este trabajo muestra resultados de simulación bajo el Método Monte Carlo de muestras policristalinas magnéticas. El estudio se basa en trabajos previos para la construcción de la muestra [3] y la interacción magnética en películas policristalinas [4]. En este trabajo, se tomó en cuenta un conjunto completo de parámetros muy aproximados a medidas experimentales tratando de realizar la estimación más realista. Las primeras conclusiones presentadas aquí se basan en el análisis de la temperatura de bloqueo obtenida a partir de las respuestas de magnetización ZFC-FC. En particular, la evaluación de la temperatura de bloqueo en el límite superparamagnético da indicaciones de los factores por los que se alteran los dominios. Se obtuvo un segundo análisis complementario con resultados de campo coercitivo y magnetización de remanencia obtenidos a partir de ciclos de histéresis.

Palabras clave: películas magnéticas nanogranulares, Método Monte Carlo, temperatura de Bloqueo, Ciclos de Histéresis

Abstract

The new technological applications in areas such as inductive components, sensors, flexible antennas and magnetic cores devices used to confine and guide magnetic fields, are focused in the development of new nanocrystalline magnetic materials. At this scale and under a constant temperature, below critical temperature, the grains trend to mono-domain state where the coercive field decreases strongly when the grain size decreases [1]. In particular, at difference of



nanoparticles, in nanocrystalline materials coercive field do not decay completely to zero due to grain boundaries permit some of connectivity between them. Then, the physics of grain boundaries turns very remarkable by the intriguing phenomenology. Different models have been proposed for quantifying the exchange interaction between grains [1][2]. Models had explained some properties at micro-meter scale. However, new models are necessary at a more reduced scale where ratio between grain boundaries atoms and core grain atoms increases considerably. An atomistic treatment is necessary due to surface and boundaries generate a new phenomenology. This work shows results of simulation under Monte Carlo Method of magnetic polycrystalline samples. The study was based on previous works for sample construction sample [3] and magnetic interaction in polycrystalline films [4]. In this work, a complete set of parameters was taking into account very approximated to experimental measures trying to realize the more realistic estimation. A first conclusions presented here is based on analysis of blocking temperature obtained from ZFC-FC magnetization responses. In particular, the evaluation of blocking temperature in the superparamagnetic limit gives indications of the factors by which the domains are altered. A complementary second analysis was obtained with results of coercive field and remanence magnetization obtained from Hysteresis loops.

Keywords: Nanogranular Magnetic Films, Monte Carlo Method, Blocking Temperature Hysteresis Loops

Referencias

- [1] Giselher Herzer, “The Random Anisotropy Model A Critical Review And Update,” in “NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry,” vol. 184, pp. 15, 2005.
- [2] D. V. Berkav and N. L. Gam, Handbook of Advanced Magnetic Materials, Numerical Simulation of Quasistatic and Dynamic Remagnetization Processes with Special Applications to Thin Films and Nanoparticles, Tsinghua University Press-Springer. 2006.
- [3] J.D. Agudelo-Giraldo, H.H. Ortiz-Álvarez, J. Restrepo, and E. Restrepo-Parra, “Magnetic Atomistic Modelling and Simulation of Nanocrystalline Thin Films,” Superlattices and Microstructures, 105, pp. 90-98, 2017.
- [4] J. D. Agudelo Giraldo, O. D. Arbelaez E., and E. Restrepo-Parra, “Atomistic Modelling of Magnetic Nano-granular Thin Films,” Physica E, 97, pp. 250-258, 2018.



Producción y Caracterización de Nanopartículas de Sílice a Partir de Cáscara de Arroz

Production and Characterization of Silica Nanoparticles from Rice Husk

Daniel Fernando Hincapié Rojas^{1,2, γ}, *Posidia Pineda Gómez*^{1,3}.

1. Laboratorio de Magnetismo y Materiales Avanzados, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia
2. Departamento de Física y Matemáticas, Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, Colombia
3. Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.

γ. Autor correspondiente: daniel.hincapier@autonoma.edu.co

Resumen

El procesado del arroz genera una gran cantidad de cascarilla, que puede convertirse en un contaminante ambiental si no recibe un manejo adecuado. Dado que la cascarilla de arroz es una fuente natural de sílice, en este trabajo se obtuvieron nanopartículas de sílice como un uso alternativo para este residuo. La síntesis de las nanopartículas se llevó a cabo con la incineración, el proceso de lixiviación ácida y la reducción del tamaño de partícula mediante molienda mecánica de bolas de alta energía. Para su caracterización, se realizaron análisis térmicos, químicos, morfológicos, estructurales y de área superficial mediante análisis termogravimétrico, método de fluorescencia de rayos X, microscopía electrónica de barrido, microscopía electrónica de transmisión, difracción de rayos X y la técnica de isoterma de adsorción/desorción de nitrógeno. Los resultados indicaron que entre 150-450°C se descomponía el material orgánico de la cascarilla, y por encima de 550°C se obtiene ceniza rica en sílice. La pureza de la sílice se incrementó efectivamente a 98,48%, mediante lixiviación ácida con ácido nítrico. La reducción del tamaño de partícula por molienda mecánica a 600 rpm durante 3 horas se logró hasta el tamaño de nanométrico. La mayoría de las nanopartículas presentaban formas esféricas con un diámetro entre 14 y 28 nm. La fase amorfa de la nanosilice fue corroborada por el pico muy ancho correspondiente al plano (101) del óxido de sílice, como lo mostraron los patrones de XRD. Se alcanzó un aumento sustancial de dos órdenes de magnitud del área superficial específica de las nanopartículas, en comparación con las partículas sin molienda. Las partículas de nanosilice obtenidas de la cascarilla de arroz pueden usarse para la producción de silicio de alto rendimiento o también pueden usarse como materiales cementicios suplementarios.

Palabras clave: Cascarilla de arroz, Nanosilica, NPs, molienda mecánica de bolas, tratamiento químico.

Abstract

The rice process generates a large amount of husk, which can become an environmental contaminant if it does not receive an adequate management. Since rice husk is a natural source of silica, in this work silica nanoparticles were obtained as an alternative use for this residue. The synthesis was carried out with the incineration, acid leaching process and particle size reduction



through high-energy mechanical ball milling. For its characterization, thermal, chemical, morphological, structural and superficial area analyses were performed by means of thermogravimetric analysis, X-ray fluorescence method, scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, X-ray diffraction, and Nitrogen adsorption/desorption isotherm techniques. The results indicated that between 150-450°C the organic material of the rice husk was released, and above 550°C was obtained ash rich in silica. The silica purity was effectively increased to 98.48%, through acid leaching with acid nitric. The reduction of particle size by mechanical milling at 600 rpm for 3 h was achieved up to nanometer size. Most of the nanoparticles were spherical with a diameter between 14 and 28 nm. Amorphous nanosilica phase was corroborated by the very broad peak corresponding to the (101) plane of silica oxide through XRD patterns. A substantial increase of two magnitude orders of the specific surface area of nanoparticles was reached, in comparison with particles without milling. The nanosilica particles obtained from rice husk can be used for the production of high-performance silicon or they can be also used as supplementary cementitious materials.

Keywords: Rice husk, Nanosilica, NPs, mechanical ball milling, chemical treatment.



Efecto de las Nanopartículas de Sílice, Obtenidas de la Cascarilla de Arroz, en el Refuerzo de Placas de Fibrocemento

Effect of Silica Nanoparticles, Obtained from Rice Husk, on Reinforcement of Fibercement Boards

Daniel Fernando Hincapié Rojas^{1,2,γ}, Posidia Pineda Gómez^{1,3}, John Fredy Guapacha Flores

1. Laboratorio de Magnetismo y Materiales Avanzados, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia
 2. Departamento de Física y Matemáticas, Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, Colombia
 3. Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.
 4. Tecnología en Cubrimiento, TOPTEC SA., Manizales, Colombia
- γ. Autor corresponsal: daniel.hincapier@autonoma.edu.co*

Resumen

La mejora de las construcciones basadas en cemento y la preservación de los recursos naturales ha sido un desafío constante para la sociedad actual. El uso de nanomateriales es un tema nuevo en la industria del cemento para producir concretos de alto rendimiento. En este trabajo se estudió el efecto de la adición de las nanopartículas de sílice, obtenidas a partir de la cascarilla de arroz, sobre las propiedades funcionales de las placas de fibrocemento. Se evaluaron tres porcentajes de adición en relación con la cantidad total de cemento: 3, 5 y 7%. Se estudiaron los cambios en la morfología, estructura, propiedades térmicas y resistencia a la flexión de las placas de fibrocemento como un efecto de la incorporación de nanosílice. Se utilizaron las técnicas de caracterización de microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos X, termogravimetría y ensayos mecánicos. La evaluación de la morfología de las placas indicó que hay más formación de productos de hidratación tales como silicato de calcio hidratado o gel de tobermorita para las muestras fabricadas con 5% de adición. Mediante análisis estructural, se corroboró la presencia de fases importantes de hidratación del cemento, como la portlandita y tobermorita. Mediante el análisis termogravimétrico se identificaron cuatro etapas características de la descomposición del fibrocemento y también se corroboró que aumentar la adición de nanopartículas generaba una disminución en la cantidad de portlandita de las placas, lo que contribuye con la resistencia del material. El análisis mecánico mostró que hubo un aumento en la resistencia a la flexión de hasta 16.25% para la placa hecha con 5% de adición de nanosílice en comparación con la muestra sin adición. Estos resultados permiten inferir que debido a su alta reactividad puzolánica, las nanopartículas promueven la reacción con portlandita para formar tobermorita, para favorecer la resistencia de las placas de fibrocemento.

Palabras clave: Cascarilla de arroz, Nanosílice, molienda mecánica de bolas, fibrocemento, tobermorita, portlandita.

Abstract

The improvement of cement-based constructions and the preservation of natural resources has been a constant challenge for today's society. The use of nanomaterials is a new topic in cement industry to produce high performance concretes. In this work the effect of the addition of the silica nanoparticles, obtained from the rice husk, on the functional properties of fiber cement plates was studied. Three percentages of addition were evaluated in relation to the total amount of cement: 3, 5 and 7%. The changes in morphology, structure,



thermal properties and flexural strength of fibercement boards as an effect of the incorporation of nanosilica were studied. The techniques of characterization of electron scanning microscopy, X-ray diffraction, thermogravimetry and mechanical tests were used. The evaluation of the morphology of the boards indicated that there is more formation of hydration products such as hydrated calcium silicate or tobermorite gel for the specimens manufactured with 5% addition. By means of structural analysis, the presence of important phases of hydration of the cement, such as portlandite and tobermorite, was corroborated. By means of the thermogravimetric analysis four characteristic stages of the decomposition of the fibercement were identified and it was also corroborated that increase the addition of nanoparticles generated a decrease in the amount of portlandite in the boards, which contributes with the resistance of the material. The mechanical analysis showed that there was an increase in resistance to bending resistance up to 16.25% for the board made with 5% addition of nanosilica compared to the sample without addition. These results allow inferring that due to its high pozzolanic reactivity, the nanoparticles promote the reaction with portlandite to form tobermorite, in favor of the strength of the fibercement boards.

Keywords: Rice husk, Nano-silica, mechanical ball milling, fibercement, tobermorite, portlandite.



Robótica Aplicada, un Desafío para la Agricultura

Applied Robotics, a Challenge for Agriculture

Luis Carlos Triviño Torres^{1, γ}, José María Sterling Collazos¹, Juan Felipe Gómez Martínez¹

1. Cundinamarca, Corporación Universitaria Minuto de Dios, Zipaquirá, Colombia

γ. Autor correspondiente: luis.trivino@uniminuto.edu

Resumen

UNIMINUTO Zipaquirá se ha acercado a la comunidad vinculándose a través del proyecto AgroRobotic y un grupo de estudiantes del programa Tecnología en Informática, quienes a través de la investigación formativa buscan potenciar diversas competencias en los estudiantes del grado décimo y undécimo de la IEM¹ Rural San Jorge. A través de un convenio de cooperación en investigación que pretende el diseño y desarrollo de sistemas robóticos para monitoreo de condiciones climáticas tales como; temperatura, humedad, humedad relativa y radiación solar en cultivos de espinacas; orientados a la toma de decisiones en agricultura de Precisión.

El acceso a nuevas tecnologías y su implementación en los diferentes procesos de cultivo, es insuficiente en la región rural del municipio [1], por lo anterior, se hace indispensable reconfigurar algunas actividades agrícolas tales como: la siembra, el riego, la fumigación y la captura de datos. Las anteriores pueden ser monitoreadas y controladas por sistemas robóticos, cuyo es objetivo es propuesto por el proyecto “AgroRobotic”.

Actualmente, se están realizando talleres de robótica y programación capacitando a los estudiantes en el desarrollo de aplicaciones móviles (App)², programación de sistemas robóticos (IoT)³ a través del micro controlador arduino, esp32 y diferentes sensores. Los anteriores procesos generan impacto en los jóvenes, quienes serán agentes activos de la investigación [2]. Con la implementación y profundización en estas tecnologías mejorará la producción en el sector agrícola.

Resultados y discusión



¹ Institución Educativa Municipal.

² Aplicaciones para móviles.

³ Internet of things (Internet de las cosas)

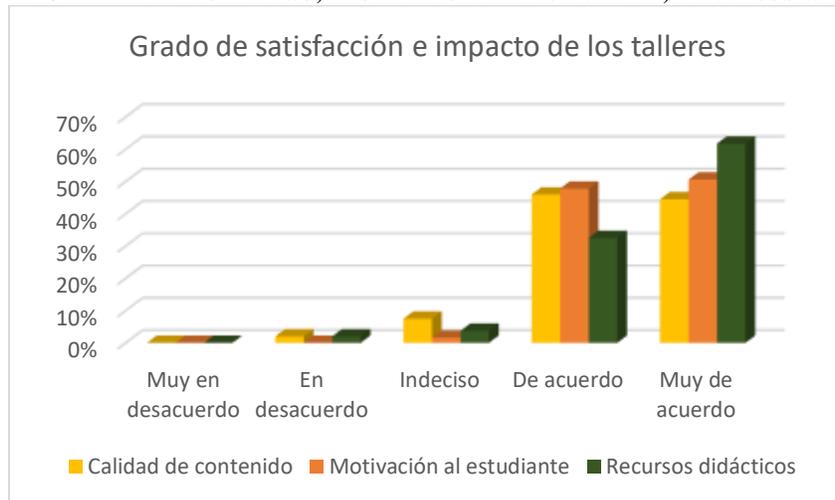


Para obtener la información se construyeron instrumentos bajo la metodología de triangulación propuesto por Cisterna [3], tal como se observa en la tabla # 1 y se usó la técnica de Likert para la medición de la apreciación de los estudiantes referente a cada una de las categorías trabajadas.

Tabla 1. Categorías involucradas en la investigación

Categoría	Subcategoría	Preguntas relacionadas
Calidad de contenido	Talleres teóricos/prácticos	¿Los talleres cumplen con el objetivo que se plantea en el proyecto de investigación? ¿Los talleres tienen lecturas que profundizan los temas expuestos en el taller? ¿Los talleres tienen ejemplos prácticos que facilitan el autoaprendizaje? ¿El contenido es relevante para cumplir con cada una de las etapas del proyecto?
Motivación al estudiante	Estrategias usadas en el proceso enseñanza/aprendizaje	¿Las actividades propuestas son coherentes con la generación de conocimientos, desarrollo de habilidades y/o la formación en valores y actitudes? ¿Los estudiantes participan activamente en el desarrollo de los talleres teórico/prácticos? ¿Las estrategias usadas por los talleristas y profesores apoyan el trabajo en equipo? ¿Las instrucciones dadas por los talleristas y profesores son claras? ¿Los trabajos propuestos por los profesores y orientadores aportan al desarrollo de pensamiento lógico del estudiante?
Recursos didácticos	Los recursos tecnológicos	¿Los elementos usados para el desarrollo de los talleres son los adecuados para cada práctica? ¿Se dispone de guías explicativas sobre cada dispositivo electrónico a usar? ¿Los talleres prácticos sobre programación son lo suficientemente claros para fomentar el aprendizaje? ¿Los dispositivos tecnológicos usados fomentan el desarrollo de nuevas habilidades tecnológicas?

Figura 1. Calidad de contenido, Motivación del estudiante, Recursos didácticos.



En la categoría de calidad de contenido el 44,5% de los estudiantes que participaron en la investigación están muy de acuerdo que se cumplió el objetivo planteado en la investigación, los talleres propuestos facilitaron la profundización en los temas trabajados, bajo la modalidad de ejemplos teórico prácticos, además el contenido fue evaluado de alta relevancia para cumplir cada una de las etapas del proyecto.

La categoría que hace referencia a la motivación del estudiante el 50,6% de los estudiantes participantes en el proyecto de investigación, están muy de acuerdo que las estrategias usadas en el proceso enseñanza aprendizaje permitieron mayor apropiación del conocimiento, desarrollo de



nuevas habilidades tanto formativa como de valores, las estrategias usadas por los investigadores fomentaron el trabajo en grupo, además durante todo el proceso se potenció el desarrollo del pensamiento lógico.

La categoría que corresponde a recursos didácticos el 61,75% de los estudiantes participantes en el proyecto de investigación, está muy de acuerdo que los elementos electrónicos, las guías explicativas sobre cada uno de los dispositivos a usar, la claridad de los talleres de programación de computadores y en general todos los recursos didácticos usados fomentan el desarrollo de habilidades tecnológicas que les permiten ser más competitivos en estas áreas del conocimiento.

Referente al agro, durante dos semanas se llevó a cabo la recolección de las variables de humedad y temperatura por medio del dispositivo básico experimental (DBE), estación que permite a través de una aplicación móvil mediante comunicación Bluetooth monitorear el cultivo de espinacas y determinar la programación del riego automático. Es así, como los estudiantes del colegio miden periódicamente el crecimiento de las plantas para verificar su efectividad.

Palabras clave: Agricultura de precisión, transferencia tecnológica, robótica aplicada, Internet de las cosas, TIC, Educación media.

Abstract

UNIMINUTO university located in Zipaquirá, has been near the community with a group of students from the technology in computer program by means of the AgroRobotic Project, they are looking for improve different competences in the tenth and eleventh grades students of the IEM rural san Jorge, through a collaborative agreement in research. This project expects to develop robotic systems for monitoring climatic conditions such as temperature, humidity, relative humidity and solar radiation in pea crops, aimed at decision making in precision agriculture.

Access to new technologies and their implementation in different farming processes is insufficient in the rural region, for that reason it is essential to adjust some farming activities such as: planting, irrigation, fumigation and data monitoring. Those activities can be controlled by robotic systems, which objective is proposed by the AgroRobotic project

Currently, students are being trained in the development of mobile applications (App), programming of robotic systems (IoT) through the arduino microcontroller, esp32 and different sensors. All of these processes generate a great impact on young people and led them to be valuable and active agents of change by means of research.

Agricultural sector will be improve with the implementation and deepening of these technologies

Keywords: Precision farming, technology transfer, Applied robotics, internet of things, Information technology and communications, Middle education.



Referencias:

- [1] C. Municipal, «<http://zipaquiracundinamarca.micolombiadigital.gov.co>,» 13 Julio 2016. [En línea]. Available: http://zipaquiracundinamarca.micolombiadigital.gov.co/sites/zipaquiracundinamarca/content/files/000021/1046_plan-de-desarrollo.pdf.
- [2] M. R. O. E. Buzarrais, «El impacto de las nuevas tecnologías en la educación en valores del siglo XXI Sinéctica,» [En línea]. Available: Recuperado de http://www.sinectca.iteso.mx/index.php?cur=37&art=37_11. [Último acceso: 1 marzo 2018].
- [3] F. Cisterna, «Categorización y triangulación como procesos de validación del conocimiento en investigación cualitativa.,» 4 Febrero 2005. [En línea]. Available: <http://fespinoz.mayo.uson.mx/categorizacion%20y%20trinagulacio%C3%B3n.pdf>. [Último acceso: 3 Abril 2018].
- [4] R. Hernández Sampieri y C. y. B. L. P. Fernández-Collado, Metodología de la investigación (6ªed.), Distrito Federal, México: Mc Graw Hill., 2010.



Pedagogical Strategies for Enhancing Machine Design Teaching in a Mechanical Technology Programme

Estrategias Pedagógicas para Mejorar la Enseñanza del Diseño de Máquinas en un Programa de Tecnología Mecánica

Carlos A. Romero-Piedrahita¹, Libardo V. Vanegas-Useche^{2, γ}, Miguel Díaz-Rodríguez³

1. Facultad de Tecnología, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia

2. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia

3. Laboratorio MECABOT, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela

γ. Autor correspondiente: lvanegas@utp.edu.co

Abstract

In comparison with their predecessors, nowadays students entering mechanical technology programs lack the basic common experiential background and interest in the architecture of machines and tools, whereas they are keen on cell phone applications, video games, and 'virtual' computer experiences. This fact causes a deficiency in the ability to relate engineering principles to real-world devices and applications. This can be partially filled with on-line and YouTube virtual resources to learn machine design and construction fundamentals. Another difficulty is the diversity of students' learning styles, an issue that can be handled with the introduction of hands-on activities. Taken into account these considerations, it is the aim of this paper to present a reformed approach to the teaching practice of the Machine Design course offered in the Mechanical Technology Programme at the Technological University of Pereira. The course combines the concepts of rational selection of materials and strength of materials with the procedures followed to shape and dimension the classical elements presented in machinery and mechanical systems. Active learning, hands-on activities, laboratory sessions, practical examples, projects, teamwork, and technological and virtual resources are used as a means to achieve effectively the learning outcomes. An important goal is to integrate strength and stiffness calculations with the engineering design process, including conceptual design, creativity, optimisation, detail design, and documentation. The use of technological tools, minor and main course projects, along with practical activities in the laboratory, is supposed to enhance the teaching process and help the students acquire the desired competences.

Keywords: active learning, curriculum, engineering education, machine design.

Resumen

En comparación con sus predecesores, en la actualidad los estudiantes que ingresan a programas de tecnología mecánica carecen de fundamentos y experiencia común e interés en la arquitectura de máquinas y herramientas, mientras que están interesados en aplicaciones de teléfonos celulares, videojuegos y experiencias informáticas "virtuales". Este hecho causa una deficiencia en la capacidad de relacionar la ingeniería con dispositivos y aplicaciones del mundo real. Esto se puede compensar parcialmente con recursos virtuales en línea y YouTube, para aprender los conceptos básicos de diseño y construcción de máquinas. Otra dificultad es la diversidad de estilos de aprendizaje de los estudiantes, un problema que se puede manejar con la introducción de



actividades prácticas. Teniendo en cuenta estas consideraciones, el objetivo de este trabajo es presentar un método reformado de la práctica docente del curso de Diseño de Máquinas ofrecido en el Programa de Tecnología Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira. El curso combina los conceptos de selección racional de materiales y la teoría de resistencia de materiales con los procedimientos seguidos para definir las geometrías y dimensiones de los elementos clásicos presentados en maquinaria y sistemas mecánicos. Se utilizan el aprendizaje activo, actividades prácticas, sesiones de laboratorio, ejemplos prácticos, proyectos y recursos tecnológicos y virtuales como medios para lograr de manera efectiva los resultados del aprendizaje. Un objetivo importante es integrar los cálculos de resistencia y rigidez con el proceso de diseño de ingeniería, que incluye el diseño conceptual, creatividad, trabajo en equipo, optimización, diseño detallado y documentación. El uso de herramientas tecnológicas, proyectos menores y principales, junto con actividades prácticas en el laboratorio, se supone que mejora el proceso de enseñanza y ayuda a los estudiantes a adquirir las competencias deseadas.

Palabras clave: aprendizaje activo, currículo, diseño de máquinas, educación en ingeniería.



Estudio de Movimientos en la Cosecha Manual de Limón Tahití.

Study of Movements in the Manual Harvest of Lemon Tahiti.

María Gissela Duque Cleves^{1, γ}, Alex Mauricio Ovalle Castiblanco², Olga Lucia Ocampo López², Leidy Natalia Gaviria Ocampo¹

1. Estudiante Maestría en Ingeniería Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, Colombia
 2. Mecánica y Producción, Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, Colombia
- γ. Autor corresponsal: maria.duquecl@autonoma.edu.co*

Resumen

El notorio crecimiento mundial en el consumo de frutas es debido a las conocidas propiedades nutricionales y funcionales de éstas[1], la diversidad de climas y características del suelo colombiano convierten al país en un potencial productor de gran variedad de cítricos. La investigación realizada fue desarrollar el estudio de macromovimientos y micromovimientos o *therbligs* en el proceso de recolección de limón Tahití, aprovechando la importancia que tiene éste fruto actualmente, de acuerdo al comportamiento progresivo en el mercado internacional con las exportaciones en Colombia; en el año 2012 este producto ocupó el primer lugar con el 80,5% en la exportación de cítricos [2]. Analizando las ventas, en el 2014 se vendió 14 veces más que en el 2012 de limón Tahití a Estados Unidos siendo éste el principal consumidor de limón Tahití colombiano, logrando pasar de US\$306.143 a US\$4,5 millones e importando el 51% de la fruta en este año que correspondió a US\$8,9 millones, utilizándolo en alimentos especialmente ceviches, guacamoles, aderezos, cócteles [3].

El limón Tahití se proyecta como un cítrico importante para el desarrollo y competitividad de las exportaciones de cítricos en Colombia, teniendo en cuenta que las limas de origen colombiano no presentan restricciones de orden fitosanitario en los mercados externos, constituyendo un producto prometedor para la fruticultura. La metodología utilizada fue de tipo descriptivo. La muestra fueron 17 recolectores con experiencia mayor a 1 año en el proceso, considerando género, edad y condiciones antropométricas en dos fincas ubicadas en el departamento de Caldas y una en el departamento de Huila que cosechan limón Tahití.

Para esto se realizó la caracterización del proceso de recolección del limón Tahití y se desarrolló el estudio de movimientos. La información se obtuvo con seguimiento en campo empleando técnicas de observación directa, entrevista, análisis de videos y datos con software libres y procesos de ingeniería de métodos. La investigación permite determinar que a nivel de micromovimientos o *therbligs* el ciclo ideal es buscar y seleccionar, alcanzar, tomar, mover, posicionar y soltar, como se observa en la figura 1.

Palabras clave: Limón Tahití, ingeniería de métodos, *therbligs*, macromovimientos, cosecha manual.

Abstract

The notorious worldwide growth in fruit consumption is due to the known nutritional and functional properties of these [1]., the diversity of climates and characteristics of Colombian soil make the country a potential producer of a variety of citrus fruits. The research carried out was to develop the study of macro-movements and micro-movements or *therbligs* in the Tahiti lemon



harvesting process, taking advantage of the importance of this fruit at present, according to the progressive behavior in the international market with exports in Colombia; in 2012 this product ranked first with 80.5% in citrus exports [2]. Analyzing sales, in 2014 it sold 14 times more than in 2012 of lemon Tahiti to the United States being this the main consumer of Colombian Tahiti lemon, managing to go from US \$ 306,143 to US \$ 4.5 million and importing 51% of the fruit in this year that corresponded to US \$ 8.9 million, using it in food especially ceviches, guacamoles, dressings, cocktails [3].

Tahiti lemon is projected as an important citrus for the development and competitiveness of citrus exports in Colombia, taking into account that the files of Colombian origin do not present phytosanitary restrictions in external markets, constituting a promising product for fruit growing. The methodology used was descriptive. The sample consisted of 17 collectors with more than 1 year of experience in the process, considering gender, age and anthropometric conditions in two farms located in the department of Caldas and one in the department of Huila that harvest Tahiti lemon.

For this, the characterization of the Tahiti lemon harvest process was carried out and the study of movements was developed. The information was obtained with field follow-up using techniques of direct observation, interview, analysis of videos and data with free software and method engineering processes. The research allows us to determine that at the level of micro-movements or therbligs the ideal cycle is to search and select, reach, take, move, position and release, as shown in Figure 1.

Keywords: Lemon Tahiti, engineering methods, therbligs, macromotions, manual harvest



Ciclo básico de recolección limón Tahití.

Figura 1. Therbligs



Referencias

- [1] D.Miranda,“Estado actual de fruticulture colombiana y perspectivas para su desarrollo”,Rev.Bras.Frusic;Jaboticabal-SP,volume especial,pp.199-205,Oct.2011.
- [2] J. R. Rojas and Corpoica CI, Principales características y tendencias del mercado de cítricos en Colombia. 2014.
- [3] Procolombia. Exportaciones turismo inversión marca país., “Altos precios y baja producción del limón mexicano, ventajas para Colombia,” 2015.

Índice de Autores

Álvaro José Rojas, 416, 433, 438, 510
Álvaro Marcos Santiago-Miguel, 263
Álvaro Restrepo, 485

A.W. Van Vuure, 349
Ainhoa Rubio-Clemente, 435
Aldemar Hernandez Gallego, 546
Alejandra Cárdenas Delgado, 381
Alejandra María Restrepo Franco, 459, 477
Alejandra Polanco, 516
Alejandro Aponte, 345
Alejandro Mejía, 390
Alejandro Posada, 445
Alejandro Ruiz, 445
Alex Mauricio Ovalle Castiblanco, 563
Alexánder Martínez Álvarez, 494
Alexander López Salgado, 375
Alfonso Rodríguez Peña, 413
Alhim Adoná Vera González, 378
Alicia Porras, 370
Alonso de Jesús Chica Leal, 506
Ana Rocío Córdoba Malaver, 170
Andrés Adolfo Amell Arrieta, 543
Andrés Bautista Villamil, 370
Andrés F. Cifuentes, 401
Andrés F. Jaramillo Osorio, 407
Andrés Felipe Uribe Ávila, 462

Andrés Jaramillo Parra, 66
Andrés Julián Pérez Rodríguez, 456
Andrés M. Valencia, 222
Andrés Ramiro Osorio Cantor, 365
Andres M. Pérez G, 491
Andres Tovar, 508
Angie Guevara, 445, 546
Arley Cardona, 445

Belarmino Segura Giraldo, 530
Brayan Darío Rosero Coral, 77
Bryand David Salamanca Briceño, 526, 541

César Augusto Álvarez Vargas, 372, 396, 519
César Augusto Rodríguez Duque, 506
César Torres Martínez, 54
Camilo Andrés Arias Niño, 510
Carlos A. Alvarez, 420
Carlos A. Trujillo Suárez, 407
Carlos Alberto Romero Piedrahita, 91, 107,
333, 409, 525, 561
Carlos Andrés Mesa Montoya, 208
Carlos D. Escobar Valbuena, 467
Carlos Ernesto Arrieta Gonzales, 543
Carlos Fernando Luna Carlosama, 430, 459
Carlos I. Cardona, 359
Carlos Porto Romero, 158
Carlos Torres Pinzón, 66

Christian Andres Bohorquez Jimenez, 522
Cristian C. Rendon, 420
Cristian Camilo García Urueña, 394
Cuauhtémoc Morales-Cruz, 17, 235, 290

Daniel Fernando Hincapié Rojas, 553, 555
Daniel R. Barco, 359
Daniel Sanín, 448, 488
Daniel Suarez, 516
Daniel Tobón, 251
Daniela López Londoño, 530
David Alejandro Collazos-Burbano, 363
David Ayala, 448
David Sebastian Matamoros Buitrago, 144
Derlis Hernández-Lara, 263
Diana Carolina Cruz Palacios, 394
Diana González, 445, 453
Diana María López Ochoa, 496
Diana Victoria Ramírez López, 416
Diana Yaquelin Barrero Malagón, 411
Diana Yulieth Soto Pineda, 354
Diego Andrés Hincapié Zuluaga, 453, 464,
486, 546
Diego Fernando Flórez Rodríguez, 394
Diego Muraca, 469

E. Alcalá-Fazio, 302
E. Córdoba Nieto, 40, 144, 401, 425
E. Santiago-Valentín, 28, 302
E. Trujillo, 349
E. Vega-Alvarado, 302
Edgar A. Gómez, 368
Edgar A. Torres, 502
Edgar Alfredo Portilla-Flores, 17, 28, 235,
276, 290, 302
Edgar Alonso Salazar Marín, 91, 107, 120
Edgar D. Díaz, 502
Edison de Jesús Henao Castañeda, 409, 525
Edson Tapias Higuera, 398
Eduard Galvis Restrepo, 66
Eduardo Alberto Pérez Ruiz, 381, 388

Eduardo Castillo Castañeda, 170, 428
Edwin E. Espinel, 185
Edwin L. Chica Arrieta, 435
Elisabeth Restrepo Parra, 551
Elisabeth Hoyos Pulgarín, 496, 499
Emmanuel Alejandro Merchán-Cruz, 263
Emmanuel Zenén Rivera Blas, 54
Erick Hernández Rengifo, 403
Esneider Cardona Buitrago, 208
Estefania Montoya Quesada, 405
Eugenio Yime Rodríguez, 158, 398, 413

Fabián Bolívar Ortegón, 158
Fabián Sánchez Salazar, 506
Fabian Humberto Fonseca Aponte, 425
Fabio M. Peña, 359
Fernando Franco Arenas, 430
Fernando J. Regino, 185, 442
Francía Restrepo de Mejía, 530
Francisco Botero, 251
Francisco David Pérez Reynoso, 318
Francisco José Mercado, 416, 433
Francy Nelly Jiménez García, 346, 459, 477
Franklin Giovanni Bastidas Cuya, 486, 546

Gabriel José Mañana Guichón, 425
Gabriel Sepúlveda-Cervantes, 235, 290
Geraldine Guisselle Fonseca De la Hoz, 494
Gerardo Andrés García Gutiérrez, 477
German Augusto Ramírez Arroyave, 144
Giacomo Barbieri, 390
Giancarlo Ramos Espinosa, 438
Guillermo Andrés Lombana Gómez, 438

Héctor Fabio Quintero, 409
Héctor Olivar Sánchez, 352
Hector A. Tinoco, 359
Helmut Alexander Rubio, 433
Hernán Darío Patiño Duque, 77
Hernan Bolaños, 251
Hernando Alexander Yepes Tumay, 533, 543

Hernando González Acevedo, 195, 378, 392
Hernando Sánchez Moreno, 158
Horacio Coral Enriquez, 467

I. Verpoest, 349
I.A. Aguirre-Hernández, 28
Iván Cano Ruiz, 413
Iván Salazar, 448, 546

J. Ivens, 349
Jaime Arcos Legarda, 508
Jaime Eduardo Manchola Romero, 365
Jaime Escobar, 473, 491
Javier Roldán Mckinley, 158, 398, 413
Jayanta Banerjee, 345
Jennifer Rolong Ibáñez, 398
Jesús Pérez, 251
Jhon F. Pazos-Ospina, 361
Joan Santiago Ravagli Reyes, 388
Joao Luis Ealo Cuello, 361, 363
Joaquín De La Cruz Salcart, 413
John Cortes Romero, 508
John Fredy Guapacha Flores, 555
John Henry Reina Estupiñan, 363
John Jairo Coronado Marín, 403
Jonathan Aguilar Bedella, 435
Jorge Fredy Llano Martínez, 381, 388
Jorge Sierra, 445, 448, 453, 456, 464, 488
José I. García, 222, 548
José L. Hernández, 420
José María Sterling Collazos, 557
Jose Dario Agudelo, 469, 551
Jose David Yepes, 533
Juan C. Alarcón, 548
Juan C. Castillo, 485
Juan Camilo Mejía Hernández, 409
Juan David Álvarez Cano, 425
Juan David Carvajal Corrales, 132
Juan David Ramírez, 409
Juan Esteban Tibaquirá, 485
Juan Felipe Arroyave, 120

Juan Felipe Gómez Martínez, 557
Juan P. Gómez, 359
Juan Pablo Casas Rodríguez, 370
Juan Pablo Flórez Suárez, 394
Juan Pablo Muñoz Vidal, 195
Juan S. Villegas S, 473
Juan Sebastián Rincón Tabares, 396, 471
Juan Sebastián Rubiano Labrador, 365
Julián Arnaldo Ávila, 430
Juliana Restrepo Trujillo, 346
Julio Alberto Casas Monroy, 486
July A. Gómez, 185, 442
Junes Abdul Villarraga Ossa, 132, 423
Justin Román Ardila, 486

Kevin Alexander Henao González, 486

L. Osorio, 349
Laura I. Velásquez, 383
Laura Juliana Suárez Collazos, 411
Leidy Natalia Gaviria Ocampo, 375, 563
Leonardo Mesa, 464
Leydi Julieta Cardenas Flechas, 541
Libardo V. Vanegas Useche, 333, 561
Lisseth Katherine Ramírez Antolínez, 519
Lucie Mesquita, 480
Luis Armando Flores Herrera, 54
Luis Carlos Flórez García, 77, 208
Luis Carlos Triviño Torres, 557
Luis F. Quirama, 485
Luis Fernando Mulcúe Nieto, 459, 477
Luis Ignacio Arboleda Serna, 538
Luis Miguel Méndez Moreno, 394
Luis Muñoz, 462, 480, 516, 522
Luis Perdomo-Hurtado, 471
Luisa Fernanda Echeverry Cardona, 459, 477

M. Pedroza-Villalba, 302
Mónica A. Villaquirán Caicedo, 405
Manuel Faraón Carbajal Romero, 318
María Camila Mesa Rodríguez, 486

María Carolina Sanchez, 433
María Eugenia Moreno Sánchez, 423
María Gissela Duque Cleves, 563
María Guadalupe Contreras Calderón, 428
María Luisa Pinto Salamanca, 502, 526, 541
María Zuluaga Posada, 496
Maria Bárbara Calva-Yáñez, 17, 235, 290
Mariana Cardona Torres, 538
Maribel Silva, 370
Mateo Del Gallego Rico, 464, 546
Matheo López, 480
Mauricio Monroy Jaramillo, 525
Mauricio Pérez Giraldo, 533
Mauricio Toro, 420
Miguel Ángel Hidalgo Salazar, 510
Miguel Díaz Rodríguez, 333, 561
Milton Coba Salcedo, 398

Noemi Hernández-Oliva, 17, 235, 290
Norbey Grisales G, 372

Olga Lucia Ocampo López, 354, 375, 477,
563
Olmer Giovanny Villamizar Galvis, 392
Omar D. López M, 473, 480, 491, 516
Oscar Fernando Avilés Sánchez, 318
Oscar Moscoso Londoño, 469, 551
Oscar Ruiz Salguero, 420

Paola Andrea Niño Suárez, 28, 54, 276, 318
Paula Andrea Capera Tobar, 510
Paula Garizado Román, 352
Posidia Pineda Gómez, 553, 555

R.G. Cañizo-Rodríguez, 28
Raúl Rivera Blas, 54

Rafael A. Ramírez, 502
Ricardo Gustavo Rodríguez-Cañizo, 263
Ricardo Moreno Chuquen, 346, 352, 423
Rosaura Anaid Suárez-Santillán, 17, 235, 290
Rubén Darío Flórez Hurtado, 372
Ruben Dario Muelas-Hurtado, 361
Ruben Olmedo Joya Espinosa, 526, 541
Ruby M. de Gutiérrez, 405
Ruth E. Cano, 222, 548

Saúl Sierra Márquez, 398
Salvador Antonio Rodríguez Paredes, 54
Samuel I. Roldan-Restrepo, 359
Santiago Baquero Franco, 66
Santiago Escobar Muñoz, 499
Santiago Restrepo Ruiz, 368
Sara Aida Rodríguez Pulecio, 403
Sebastián Durango I, 372
Sebastián Porras, 516
Sebastian Calderon, 469
Sergio Alejandro Díaz Contreras, 506
Sergio Iván Zapata Torres, 538
Sergio Roa, 516
Steven Galvis Holguín, 456, 488

Vladimir Prada Jiménez, 276

William Daniel Moscoso Barrera, 365
Wilman Alonso Pineda Muñoz, 502, 526, 541
Wilmer Guevara, 442
Wilson Pérez Castro, 409

Yamid Gonzalo Reyes Florez, 40
Yesid Montoya Góez, 496
Yustin Román Ardila, 448, 453

Índice Temático

Automatización y Control, 54, 66, 185, 235,
390, 392, 398, 467, 494, 508

Bioingeniería, 222, 318, 359, 365, 394, 411,
413, 428, 530

Diseño

Asistido por Computador, 132, 170, 222,
413, 420, 533

Estructural y de Máquinas, 91, 158, 170,
302, 333, 423, 442, 471

Industrial y Diseño de Producto, 91, 132,
375, 433

Mecánico, 561

Mecatrónico, 170, 195, 290, 378, 416,
438, 502, 526

Educación en Ingeniería, 333, 561

Energética, 346, 352, 354, 383, 459, 477,
485, 506, 543, 546

Industria 4.0, 425

Ingeniería del Automóvil, 120, 409, 480,
485, 525

Ingeniería del automóvil, 354

Manufactura

Aditiva, 510

Asistida por Computador, 144, 401, 425

Ecoeficiente, 553, 555

Ecoflexible, 345

Ingeniería de Precisión y

Nanofabricación, 553, 555

Optimización de Procesos de
Fabricación, 40

Sistemas, Procesos y Tecnologías de
Manufactura, 107, 372, 381, 388,
401, 430, 499, 543

Materiales

Compuestos, 263, 349, 370, 405, 407,
469, 496

Mecánica

Aplicada y Computacional, 17, 77, 208,
276, 445, 448, 453, 462, 464, 480,
486, 488, 491, 533, 551

Aplicada y Mecánica Computacional,
354

aplicada y mecánica computacional, 543
de Fluidos, 383

de Materiales, 396, 403, 499, 519, 533

Mecanismos y Robótica, 17, 28, 368, 378,
411, 541, 548, 557

Mecatrónica, 170, 195, 290, 378, 416, 425,
438, 502, 526

Metalurgia

Tratamientos Térmicos de los Aceros,
381

Procesos Agroindustriales, 563

Sistemas Dinámicos, 473, 516, 538

Termodinámica, 471

Turbomaquinaria, 251, 435, 456, 488, 522

Vibraciones Mecánicas y Acústica, 361, 363,
423



IV Congreso Internacional
AMDM 2018

