

Tecnologías Avanzadas de Mecatrónica, Diseño y Manufactura

Segundo Congreso Internacional AMDM 2014

o **Compilador**

Comité Segundo Congreso Internacional
sobre Tecnologías Avanzadas de Mecatrónica,
Diseño y Manufactura (AMDM 2014)



UNIVERSIDAD
CENTRAL



CONSEJO SUPERIOR

Fernando Sánchez Torres
Presidente

Rafael Santos Calderón
Jaime Arias Ramírez
Jaime Posada Díaz

Consejeros

Carlos Alberto Hueza

**Representante suplente
de los docentes**

Germán Ardila Suárez

Representante de los estudiantes

Rector

Rafael Santos Calderón

Vicerrector Académico

Luis Fernando Chaparro Osorio

Vicerrector Administrativo y Financiero

Nelson Gnecco Iglesias

Una publicación del Departamento de Ingeniería
de la Facultad de Ingeniería electrónica

Segundo Congreso Internacional sobre Tecnologías
Avanzadas de Mecatrónica, Diseño y Manufactura
AMDM 2014

ISBN: 978-958-26-0212-3

Primera edición: 2014

Compilador: Comité Segundo Congreso Internacional sobre Tecnologías
Avanzadas de Mecatrónica, Diseño y Manufactura (AMDM 2014)

Ediciones Universidad Central
Carrera 5 n.º 21-38, Bogotá D. C. Colombia
PBX: 323 98 68, ext.. 1556.
editorial@ucentral.edu.co

PRODUCCIÓN EDITORIAL

Coordinación Editorial

Dirección:

Héctor Sanabria Rivera

Diseño y diagramación:

Patricia Salinas Garzón

Corrección de textos:

Pablo Clavijo y Orlando Rebolledo

Publicado en Colombia - Published in Colombia



Material publicado de acuerdo con los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0). Usted es libre de copiar o redistribuir el material en cualquier medio o formato, siempre y cuando dé los créditos apropiadamente, no lo haga con fines comerciales y no realice obras derivadas.

Tecnologías Avanzadas de Mecatrónica, Diseño y Manufactura

Segundo Congreso Internacional AMDM 2014

o **Compilador**

Comité Segundo Congreso Internacional
sobre Tecnologías Avanzadas de Mecatrónica,
Diseño y Manufactura (AMDM 2014)



Apoya



UNIVERSIDAD
CENTRAL

Presentación

El Segundo Congreso Internacional sobre Tecnologías Avanzadas de Mecatrónica, Diseño y Manufactura (AMDM 2014) fue un encuentro organizado por la Universidad Central con el apoyo de la Universidad Tecnológica de Pereira, la Universidad Militar Nueva Granada, la Universidad Autónoma de Manizales, la Universidad del Valle, la Fundación Universidad Autónoma de Colombia, el Instituto Politécnico Nacional de México, el Instituto Politécnico de Cataluña y la Universidad de los Andes. Asimismo, contó con el apoyo de Aciem y de las empresas All Robotics y Microscopios y Equipos Especiales S. A. S.

El evento se celebró del 22 al 24 de octubre, en Bogotá, y buscó reunir a docentes, investigadores, profesionales y estudiantes de áreas afines al diseño, la manufactura y la mecatrónica, con el fin de intercambiar conocimientos en conferencias magistrales, presentaciones y pósteres.

Igualmente, los organizadores aunaron esfuerzos para lograr el mismo éxito académico que tuvo su primera edición, que tuvo lugar en la Universidad Tecnológica de Pereira en el mes de septiembre del año 2012 como parte fundamental de la integración de nuestras instituciones en aspectos estratégicos de investigación.

Así, al igual que en la primera edición, se destacó la participación de conferencistas nacionales e internacionales que poseen una gran experiencia en los campos de la automatización, la robótica, el diseño mecatrónico y los procesos de diseño y manufactura. Entre ellos se contaron:

Antonio Barrientos. Doctor en Ingeniería Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid y magíster en Tecnología e Instrumentación Biomédica de la UNED. Su trabajo ha abordado diferentes actividades de investigación y desarrollo en robótica, orientadas al diseño y control de robots y telerrobots, a los robots de servicio y a los sistemas de fabricación robotizados. En la actualidad, su trabajo investigativo se centra en los robots aéreos y la ingeniería biomédica.

Carlos Eduardo Pereira. Doctor en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Stuttgart (Alemania), magíster en Ciencias de la Computación de la Universidad Federal de Río Grande del Sur (Brasil) y presidente del Consejo Superior de la Sociedad Brasileña de Automática (SBA). En el Congreso presentó las conferencias “Automatización y control en Brasil: oportunidades para la industria y el mundo académico y el papel desempeñado por la SBA” y “Control, automatización y educación en ingeniería: la combinación de los laboratorios físicos, remotos y virtuales”.

Paola Andrea Niño. Doctora en Ciencias en Ingeniería Eléctrica y magíster en Ingeniería Eléctrica, en el Área Biomédica, de la Universidad de los Andes. Sus áreas de profundización en investigación son la biomecatrónica y la robótica móvil. Su presentación versó sobre la *nueva manera de hacer ingeniería*, en la cual se apoyan ahora los ingenieros para desarrollar proyectos usando diseños preliminares elaborados a partir de la interacción de varios *software*.

Carlos Julio Cortés Rodríguez. Doctor en Ingeniería de la Universidad de Kassel (Alemania) y magíster en Materiales y Procesos de Fabricación y en Ciencias Económicas, con énfasis en Industria y Tecnología. Su exposición recorrió conceptos básicos de manufactura y de evolución de estrategias de producción. Luego se refirió a cómo abordar procesos de fabricación moderna considerando diferentes aspectos: económicos, debidos a la globalización (diferenciación de productos, disminución de costos y rápida innovación); tecnológicos, debidos a la aparición de nuevos materiales (necesidad de baja variabilidad y complejidad de la forma); energéticos (utilización racional de la energía); y ambientales (disminución de impactos medioambientales).

Fernando Otero. Se ha desempeñado como coordinador de control de procesos, asesor externo e instructor y es especialista en el uso de herramientas de control en múltiples industrias químicas, de petróleo y gas, de refinación, de servicios públicos y de energía y papel. Se destaca por sus conocimientos en optimización y automatización de procesos. En su intervención mostró hacia donde se dirige la automatización de procesos: hacia las redes de comunicación industrial. Asimismo, presentó los elementos básicos de la automatización y resaltó como el más importante la necesidad de optimizar la utilización de la planta, su rendimiento, seguridad y disponibilidad.

Edgar Portilla Flores. Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (IPN) de México y magíster en Ciencias en Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico de Puebla. Su conferencia se centró en las metaheurísticas: algoritmos para resolver de manera aproximada una amplia gama de problemas de optimización usando técnicas de prueba y error. Las tareas principales en las metaheurísticas son la diversificación (exploración) y la intensificación (explotación). Las técnicas basadas en población permiten una buena exploración, pero su explotación es normalmente deficiente.

Mauricio Mauledoux. Es profesor del programa de Ingeniería en Mecatrónica, de la Maestría en Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Militar Nueva Granada e investigador del grupo Davinci, en el área de Robótica de Manipuladores. Su intervención se centró en las redes eléctricas inteligentes y su necesidad para el desarrollo local de las comunidades. Planteó el cambio de paradigma de los sistemas interconectados eléctricos y presentó las ventajas que ofrecen las redes eléctricas. Además, resaltó la relevancia de las comunicaciones y el control para hacer realidad las redes eléctricas inteligentes.

Gracias a sus intervenciones y a los esfuerzos y la participación de toda la comunidad académica e investigativa nacional, la segunda edición del Congreso contó con cerca de 300 asistentes —entre conferencistas, estudiantes y docentes— y presentó 35 artículos en calidad de ponencias y 11 en calidad de pósteres en las áreas de automatización, control y mecatrónica, robótica, mecánica, instrumentación y materiales.

Ponencias

	Pág.
1. Diseño y construcción de un banco de pruebas para el ensayo de transmisiones por engranajes	9
2. Estudio de la variación de la rugosidad y dureza superficial en piezas torneadas con la asistencia de electroplasticidad	17
3. Diseño mecánico de sistema robótico modular reconfigurable	25
4. Algoritmos meméticos: un compendio	31
5. Detección de cavitación en una bomba centrífuga utilizando analisis de envolvente	37
6. Aplicación del control robusto al control de vuelo para el seguimiento de trayectorias en proyectiles tierra-tierra	43
7. Emisiones en regímenes de estado estable de dos sistemas que operan con mezcla E20 etanol-gasolina	51
8. Análisis biomecánico y simulación de la rodilla protésica	59
9. Cálculo de fuerza para agarre óptimo de un efector final de tres dedos utilizando el algoritmo de forrajeo de bacterias	65
10. Implementación de FEM para la mejora tecnológica del diseño de forja en caliente en Herragro S. A.	71
11. Mano robótica teleoperada	79
12. Plataforma didáctica para robótica paralela	85
13. Entorno virtual para la simulación de un <i>quadrotor</i> usando el <i>framework</i> ROS Hydro	93
14. Diseño mecánico del ACM1PT, primer prototipo de un carro autónomo para minería	99
15. Diseño y construcción de un arreglo helicoidal masivo de transductores Murata MA40S4S a 40 KHz	103
16. Estrategia para la autorreconfiguración para el sistema robótico modular Mecabot	109
17. Comparación del rendimiento computacional entre diferentes metodologías de procesamiento en paralelo para FEA vía ANSYS® 14.5	115
18. Ensamble, análisis y simulación del vehículo Open ROV v2.6	121
19. Robot transportador omnidireccional	129
20. Análisis estructural de materiales en las prótesis parciales para artroplastia	135

	Pág.
21. Orugas para locomoción de plataformas robóticas.....	141
22. Construcción de celdas de carga tipo anillo y análisis de su comportamiento mecánico.....	147
23. Resultados preliminares en la fabricación de transductores ultrasónicos a partir de PVDF-TrFE para aplicaciones en aire	153
24. Herramienta para realizar <i>software-in-the-loop</i> mediante sistema operativo de robots	159
25. Sistema de adquisición de los movimientos de la mano a través de un guante de datos	165
26. Caracterización de uniones adhesivas, utilizando adhesivos a base de quitosán, hidroxipatita y carbonato de calcio	173
27. Implementación de un sistema de video estereoscópico por medio de complementos NVIDIA para laboratorio remoto	181
28. A new index for damage identification in active beams with electromechanical impedance technique (EMI) approach to SHM	187
29. Predicción neuronal de consumo energético ante variaciones de tráfico vehicular	193
30. Proceso de desarrollo de encerramientos orientado a mejorar el desempeño electromagnético de los productos electrónicos	199
31. Metodología de diseño integrado para tapadora lineal en un proceso de embotellado	207
32. Control basado en observadores GPI de un helicóptero 2-DOF: enfoque de rechazo activo de perturbaciones	213
33. Diseño y construcción de un <i>gripper</i> implementando optimización	219
34. Esquema discreto de control de posición para teleoperación de un manipulador móvil	223

Pósteres

	Pág.
1. Development of an electric wheelchair with infant car seat for children between five and ten years of age using wireless control	229
2. Desarrollo de materiales, procesos y equipos magnetorreológicos para beneficio de minerales	235
3. Satellite mission Libertad 2	241
4. Análisis de la eficiencia, diseño y fabricación de un transformador de 1600 kVA.	247
5. Simulación de maniobras en bancos de condensadores.....	255
6. Cálculo de trayectorias para preagarrar de un efector final mediante visión de máquina.....	263
7. Diseño y construcción de un robot gusano tipo explorador.....	271
8. Sistema robótico para rehabilitación de marcha enfocado a niños con parálisis cerebral.....	277
9. Control difuso para tanques de agua de uso residencial	283
10. Identificación, modelado y control de un motor DC sensado con un tacogenerador	289

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA EL ENSAYO DE TRANSMISIONES POR ENGRANAJES

Design and construction of a test rig for testing gear transmissions

RESUMEN

Los bancos de pruebas de engranajes reproducen las condiciones de contacto entre los dientes de estos elementos mecánicos. Estos bancos se usan para evaluar la eficiencia, lubricación, desgaste y otros fenómenos destructivos que afectan la vida de los engranajes, en función de variables como la velocidad, las fuerzas, y el tipo y temperatura del lubricante. En este trabajo se presenta el diseño, construcción e instrumentación de un banco de pruebas de engranajes de tipo regenerativo, destinado al estudio de engranajes cilíndricos de dientes rectos, mediante la medición de los pares y velocidades de los árboles. Se hace, además, una revisión de los bancos y dispositivos para medir el par. Los resultados experimentales permitirán entender mejor el comportamiento de los engranajes, para obtener mayor eficiencia y durabilidad.

Palabras clave: banco de pruebas, diseño, durabilidad, eficiencia, transmisiones dentadas.

ABSTRACT

Gear transmission test rigs simulate gear tooth contact conditions. These rigs are used in order to assess efficiency, lubrication, wear, and other destructive phenomena that affect gear life, as a function of variables such as speed, forces, and type and temperature of lubricant. This paper presents the design, manufacture, and instrumentation of a regenerative-type test rig, aimed at the study of cylindrical spur gears, through the measurement of shaft torques and speeds. Besides, a review of the rigs and devices to measure torque is presented. The experimental results will enable an improved understanding of gear behavior, in order to obtain a higher mechanical efficiency and longer lifespans.

Keywords: design, durability, efficiency, gear transmissions, test rig.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de las transmisiones mecánicas es de gran importancia, debido a su uso masivo. Si bien las transmisiones dentadas se caracterizan por un alto rendimiento mecánico, una reducción del 99 al 98 %, aparentemente insignificante, aumenta significativamente el desgaste y duplica la cantidad de calor generado y las pérdidas de energía y de dinero.

En la zona de influencia de la Universidad Tecnológica de Pereira operan algunas empresas fabricantes de elementos de transmisión de potencia como Industrias Ramfe, Transmisiones de Potencia y Reductores Fama. Ya que en ellas no se realizan pruebas de durabilidad, de desempeño ni de valoración energética, se ha diseñado un banco experimental que permita realizar las pruebas mencionadas. El banco permite evaluar la influencia del lubricante, la temperatura de operación y la calidad de la alineación de los componentes, entre otros factores, sobre el rendimiento mecánico, el ruido y la vibración de las transmisiones. Por otro lado, se tiene la necesidad de proveer de herramientas para la enseñanza, validar

conceptos, estudiar el desempeño y prestar servicio relacionado con las transmisiones de potencia.

Este trabajo describe el ensamble de un banco de pruebas de transmisiones por ruedas dentadas. El banco es del tipo de potencia circulante, para ensayos de reductores de bajas potencias (1 - 0,5 kW), y se ha instrumentado para estudiar los efectos producidos por variaciones de ajustes en las transmisiones y en los montajes de los ejes, así como para valorar la influencia del lubricante. El banco también sirve para estudiar la durabilidad de las transmisiones bajo diferentes condiciones de operación, incluyendo la variación de los materiales empleados en ellas.

En este trabajo se presentan inicialmente los conceptos de pérdidas mecánicas y la naturaleza de las mismas; luego se resumen las alternativas de los sistemas de pruebas de las transmisiones dentadas. En la tercera parte se describe la composición del banco de pruebas construido. En la parte final se presentan las conclusiones del trabajo hasta aquí realizado y se da un avance de los trabajos que realizará próximamente el grupo de trabajo.

CARLOS ALBERTO ROMERO PIEDRAHÍTA

Ingeniero mecánico, Ph. D.
Profesor Titular
Escuela de Tecnología Mecánica
Universidad Tecnológica de Pereira
cromero@utp.edu.co

JUAN FELIPE ARROYAVE LONDOÑO

Ingeniero mecánico, M. Sc.
Profesor
Escuela de Tecnología Mecánica
Universidad Tecnológica de Pereira
jfa@utp.edu.co

LIBARDO VICENTE VANEGAS USECHE

Ingeniero mecánico, Ph. D.
Profesor Titular
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Pereira
lvanegas@utp.edu.co

2. RENDIMIENTO MECÁNICO DE LAS TRANSMISIONES DENTADAS

El rendimiento mecánico es uno de los parámetros más importantes del diseño, la selección y explotación de los reductores y las cajas de velocidades. Del rendimiento dependen la potencia demandada al motor y el calor disipado por la transmisión. Sobre el rendimiento influye la potencia por transmitir, la velocidad angular de las ruedas, las propiedades del aceite, el tipo de engranajes, el grado de exactitud y la geometría de las transmisiones, entre otros factores. Usualmente, el rendimiento se asume; sin embargo, muchas veces las características de aplicación de la transmisión imponen regímenes específicos en los cuales el rendimiento puede diferir mucho del rendimiento nominal especificado por el fabricante.

Las pérdidas de potencia, N_p , en las transmisiones de engranajes se componen de las pérdidas por fricción de rodadura y deslizamiento en el engrane mismo, las pérdidas en los apoyos y los sellos, las pérdidas en el salpique y mezclado del aceite lubricante (pérdidas hidráulicas) y las pérdidas aerodinámicas. Todas estas pérdidas hacen que la potencia en el árbol conducido (de salida) de la transmisión, N_2 , sea menor que la potencia de entrada, N_1 . La relación $\eta = N_2/N_1$ se denomina rendimiento de la transmisión, que también se puede expresar como:

$$\eta = \frac{N_1 - N_p}{N_1} = 1 - \frac{1}{N_1/N_p}. \quad (1)$$

Entre las pérdidas se diferencian aquellas que dependen de la carga transmitida, como las pérdidas por fricción en el engrane, y las pérdidas constantes, que no dependen de la carga, como las pérdidas en los sellos y las hidráulicas. Por esto, el rendimiento es menor con la disminución de la carga, porque aumenta la ponderación de las pérdidas constantes. Sobre la magnitud de las pérdidas influyen el tipo de transmisión dentada, el grado de exactitud, el tipo de lubricante, el acabado de las superficies de trabajo de los dientes, el coeficiente de desplazamiento, los números de dientes del piñón y de la rueda, el material de las ruedas, la velocidad, la exactitud de montaje de los rodamientos y otros factores.

Para transmisiones sin desplazamiento, Ivanov [1] recomienda calcular el rendimiento del engrane así:

$$\eta_{engr} = 1 - 2,3f \left[\frac{1}{z_1} \pm \frac{1}{z_2} \right], \quad (2)$$

Donde z_1 y z_2 son los números de dientes del piñón y de la rueda; y $f \approx 0,06...0,1$ es el coeficiente de fricción del engrane. Si las condiciones son desfavorables,

$f \approx 0,12...0,14$. El signo “+” es para transmisión externa y el signo “-” es para transmisión interna. Para transmisiones corregidas, f se aumenta por un coeficiente que valora la influencia del desplazamiento (por ejemplo, para $x = 1,2$, f se duplica).

Las pérdidas, en kW, por efecto del salpique y mezclado del aceite se pueden valorar experimentalmente así:

$$N_l = 10^{-3} v b \sqrt{v \nu (z_1 + z_2)}, \quad (3)$$

Donde v es la velocidad (m/s), b es el ancho de la rueda (mm) y ν es la viscosidad cinemática del aceite (cSt).

El rendimiento en los apoyos, η_{ap} , se toma igual a 0,95...0,99 para un par de rodamientos, y 0,96...0,98 para un par de cojinetes.

El rendimiento total de la transmisión se calcula como:

$$\eta = \eta_{engr} \cdot \eta_l \cdot \eta_{ap}. \quad (4)$$

Un estudio reciente sobre las pérdidas en engranajes es el realizado por Croes e Iqbal [2]; en él se resumen los logros alcanzados en términos de modelación validada. El trabajo menciona los resultados de Petry-Johnson [3] y Seetharaman [4] sobre las pérdidas aerodinámicas y por borboteo del aceite. Sánchez [5] también hace una revisión de los modelos de eficiencia de engranajes disponibles en la literatura moderna. Los reportes técnicos ISO/TR 14179-1:2001 e ISO/TR 14179-2:2001 contienen relaciones empíricas y teóricas para evaluar el rendimiento de los pares dentados considerando pérdidas por rozamiento en el contacto diente-diente, por borboteo del aceite y por rozamiento en rodamientos y sellos.

3. MÉTODOS USADOS EN LOS ENSAYOS DE TRANSMISIONES DE POTENCIA

Los ensayos sobre engranajes pueden ser de fabricación o de investigación. Los de fabricación persiguen la verificación y apreciación de la calidad de fabricación y montaje y el rodaje bajo carga, para aumentar el rendimiento y la longevidad. Los ensayos de investigación tienen como fin la determinación de la influencia de los factores de construcción, geométricos y de explotación, sobre la capacidad portante y el rendimiento y la elección de soluciones de construcción óptimas. Los ensayos se efectúan en bancos de pruebas especiales, compuestos por un accionamiento, la transmisión por ensayar, el dispositivo de carga, el sistema de lubricación, los instrumentos de medición y control, y el equipo de sistematización. Para medir las pérdidas se puede recurrir a la medición de variables mecánicas, como el par y la velocidad; eléctricas, como el voltaje y la corriente consumidos por el motor; o térmicas, como las temperaturas y el gasto de fluidos de refrigeración.

Un banco de ensayo de ruedas dentadas, según el flujo de potencia, puede ser de disposición *directa* (disipación total de energía) o de *recirculación* de potencia (de “cortocircuito” mecánico). La disposición directa (figura 1) es la más sencilla y económica; en ella los engranajes que se van a ensayar se interponen entre un motor y una carga, formando un lazo de potencia abierto. La energía transmitida se pierde por disipación en un freno.

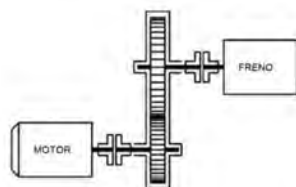


Figura 1. Esquema de un banco de disposición directa.

El banco de ensayos con lazo de potencia abierto permite experimentar directamente sobre los engranajes de prueba; en este caso, los costos de inversión son más bajos porque se requieren menos componentes. Sin embargo, el motor debe suministrar toda la potencia necesaria para garantizar la carga de ensayo; además, dependiendo del tipo de freno empleado y su sistema de control, el costo de la instalación puede ser elevado.

En los bancos con recirculación de potencia (figura 2), la carga que actúa sobre el tren de engranajes es al tiempo un recuperador de energía. Esta energía es transformada y reintroducida en un punto inicial del lazo de potencia. El punto de realimentación donde se recupera la potencia puede ser un punto anterior al actuador (esto es propio de sistemas con recirculación hidráulica o eléctrica), o posterior al actuador (un tipo de lazo empleado en sistemas con recirculación mecánica). Una desventaja de estos sistemas es que tanto los engranajes de prueba como los engranajes esclavos sufren desgastes similares.

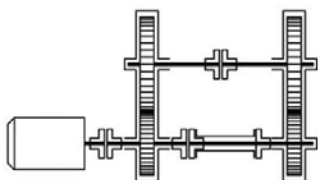


Figura 2. Esquema de un banco de recirculación de potencia.

Desde el punto de vista energético, la solución más eficiente de recirculación es la realizada por medios puramente mecánicos. En esta clase de sistemas, la potencia realiza un recorrido cerrado dentro del banco, de manera que la energía que se va a suministrar externamente es solo aquella debida a las pérdidas internas. El tren de engranajes por ensayar se instala paralelo a un tren auxiliar, con idéntica relación de

transmisión que el primero. El movimiento y la potencia de pérdidas son entregados por el motor, mientras que para la introducción del par es necesaria la torsión de uno de los ejes (precarga del conjunto con el par deseado para el ensayo). El número de componentes no mecánicos en este tipo de disposición se reduce al motor, el cual es de mucho menor potencia que los necesarios en bancos con disposición directa o en bancos con recirculación no mecánica, pues todos aquellos tienen que introducir el total de la potencia de ensayo.

La flexibilidad es la principal limitante de los bancos de recirculación de potencia, ya que se dificulta la variación del par durante el ensayo. No obstante, este es el tipo de banco más empleado para la medición de las pérdidas de fricción globales de los conjuntos del tren de potencia de los sistemas de transmisión de los vehículos, así como para los ensayos de durabilidad.

En el banco de cortocircuito, la energía consumida por el motor es la energía gastada en las pérdidas mecánicas globales y transformadas en calor. Midiendo la energía entregada por el motor se obtiene la información para determinar la eficiencia de la transmisión; las pérdidas incluyen todos los pares mecánicos del circuito. El resultado, tras descontar las pérdidas conocidas, corresponde al doble de las pérdidas en el elemento de interés estudiado. La relación entre las pérdidas de potencia de uno de los elementos estudiados y la potencia que circula en el sistema es la eficiencia.

3.1 Bancos de pruebas de recirculación de potencia

Un banco recirculante consiste en dos juegos iguales de engranajes dispuestos espalda con espalda, de manera que los ejes rápidos quedan conectados, y se reinyecta al circuito toda la potencia (excepto por las pérdidas). La idea básica se explica en la figura 3. El par dentado objeto de la prueba es denominado *esclavo*, mientras que al otro se le llama par *maestro*. En la mayoría de estos bancos la carga se aplica en estado estático. El principio de carga en el banco se reduce a torcer uno de los ejes en el circuito y dejarlo bloqueado en ese estado deformado, de manera que el par así generado se transmite a través del ramal de prueba al reductor objeto de la prueba.

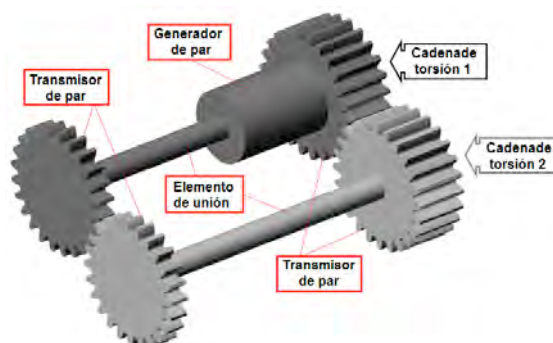


Figura 3. Operación de un banco de potencia recirculante.

3.2 Dispositivos utilizados para generar el par en los bancos de recirculación de potencia

Entre las máquinas más citadas en la literatura para pruebas de transmisiones dentadas está la FZG (*Forschungsstelle für Zahn-räder und Getriebebau*, Centro de investigación para ruedas dentadas y engranajes) [6], [7], desarrollada por la Universidad Técnica de Múnich. Esta máquina es una de las más utilizadas y se compone de dos cajas de engranajes. En una de las cajas se encuentra montado el par de engranajes fijos de la máquina, y en la otra los de ensayo, y en ambos pares existe la misma relación de transmisión. El árbol más lento posee un elemento intermedio para la medición del par torsor. El eje rápido está conectado mediante un acoplamiento embrizado, que permite a ambos extremos rotar uno con respecto al otro. A través de este acoplamiento se aplica el par de ensayo mediante una palanca y un contrapeso, cuya activación se ejecuta a través de un pasador de bloqueo que impide el movimiento relativo entre las bridas, con lo cual se transmite así el torque aplicado [6], [7]. Esta máquina es muy utilizada para determinar la capacidad de carga por desgaste de aceites lubricantes y grasas, y la influencia de estos sobre el coeficiente de fricción, la eficiencia y la formación de picaduras y micropicaduras.

Según el modo de aplicación del par de carga, las máquinas de ensayo circulante pueden ser clasificadas en sistemas mecánicos e hidráulicos. Mihailidis y Nerantzis [8] hicieron una detallada revisión de los sistemas mecánicos de aplicación de par a partir del sistema FZG. Estos autores detallan el sistema con cargador planetario simple y doble junto con transmisión sinfin auxiliar, el sistema de trenes de engranajes planetarios insertado en uno de los lazos del circuito cerrado de potencia, y la inserción de transmisiones armónicas y cicloidales para imponer el par. Se destaca especialmente la idea de aplicar la carga introduciendo dentro del lazo de potencia un par de engranajes adicional que genere el par de ensayo cuando este es movido en dirección transversal, de manera que se pueda variar rápidamente el par de ensayo. Una variación de esta alternativa consiste en aplicar el par mediante rotación de la caja reductora completa, como lo sugiere Åkerblom [9].

Para la variación dinámica del par puede introducirse un par de flanches de estrías helicoidales acoplados a un sistema de control hidráulico; se busca que con la aplicación de la presión en uno de los compartimentos se genere una carga axial sobre el árbol intermedio y el consiguiente par de ensayo requerido.

Los estándares para pruebas de engranajes hacen referencia a las principales máquinas utilizadas para el ensayo de engranajes: NASA (EE.UU.), FZG (Alemania), Ryder (EE.UU.) e IAE (Inglaterra), y

coinciden con las más citadas en las publicaciones referentes a trabajos de investigación sobre engranajes [3], [8-15].

En la máquina Ryder se tiene una sola caja de engranajes con dos árboles conectados por dos pares de engranajes cilíndricos de la misma relación de transmisión, pero de diferente ancho de cara, con lo cual forman un lazo de potencia cerrado. Los engranajes delgados son rectos mientras los anchos (los de ensayo) son helicoidales. La carga se aplica a los engranajes de ensayo mediante movimiento axial de un engranaje helicoidal relativo al otro generado por la acción de una presión hidráulica sobre el pistón ubicado en el interior del cubo de uno de los engranajes helicoidales [11]. Esta máquina no es muy versátil en su utilización.

4. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

El banco está compuesto por el sistema mecánico y el sistema de medición. Los elementos principales empleados son: motor eléctrico monofásico Siemens (1LF7 091-4YA90), dos reductores de engranajes cilíndricos helicoidales Ramfe (RH 313 AB3 35/1) y dos reductores de engranajes cónicos Ramfe (RIV 82 P01AB3 2/1); dos reductores maestros y dos esclavos. El diseño modifica el sistema básico de la figura 2 (máquina FZG), en el cual el motor se acopla directamente a un ramal de entrada para multiplicar las revoluciones del motor; además, se incluye un par dentado adicional. El esquema ideado (figura 4) presenta cuatro subconjuntos y se basa en un mecanismo de potencia circulante, en el que los subconjuntos A, B y D poseen la capacidad de transformar los parámetros de energía del banco circulante; estos subconjuntos se comunican a través de los elementos que componen el subconjunto C.

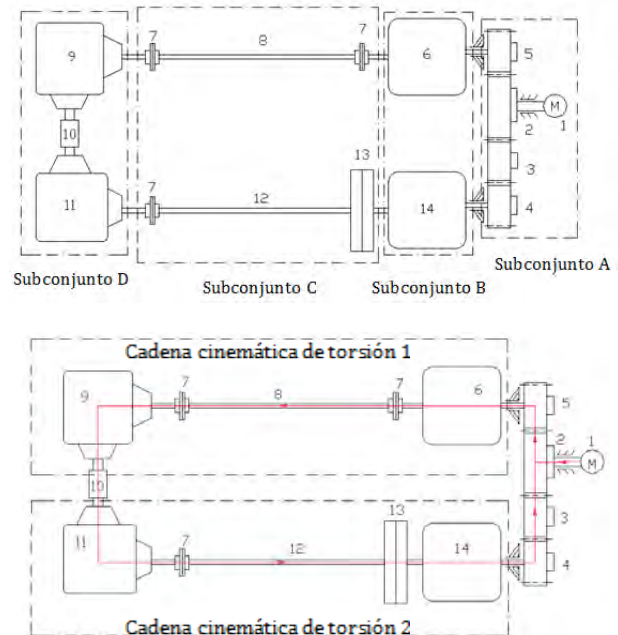


Figura 4. Esquema del banco de pruebas. 1 - motor eléctrico, 2 - rueda de entrada de potencia del motor, 6 y 14 - reductores cilíndricos concéntricos, 7 - acoples rígidos, 8 y 12 - ejes de los ramales, 9 y 11 - reductores ortogonales de engranajes cónicos, 10 - acople para reductores de engranajes cónicos, 13 - dispositivo de carga para la medición del par; el reductor 6 se monta sobre rodamientos, de manera basculante.

En la figura 4b se muestra la distribución de la potencia mecánica y el momento torsor del banco de pruebas. El momento solicitado para deformar los ejes 8 y 12 es generado por el tren de engranes 2 a 5. El mecanismo transforma los parámetros de potencia y velocidad de rotación del motor eléctrico; los acoples comunican el sistema multiplicador/tren de engranajes con los reductores 6 y 14. Luego, a través del eje 8 se consigue transmitir los parámetros mecánicos del reductor 6 al reductor 9, donde 9 modifica nuevamente los valores de potencia y velocidad de rotación. Al llegar a 9, el diagrama de momentos de la figura 4 se cierra, debido al momento de reacción que el reductor 11 ejerce sobre 9, pero el transmisor 11 estará sometido al momento torsor que le transmite 9.

En la cadena cinemática de torsión 2, el signo de momentos será opuesto al pasar por el reductor 11, ya que la transmisión entre 9 y 11 invierte el sentido de momento; luego, a través del eje 12, se consigue transmitir los parámetros mecánicos entre el reductor 11 y el dispositivo de carga 13, el cual puede someter a un estado determinado de tensión a todo el sistema de transmisión mecánica. Al llegar al reductor 14, este es sometido a un momento, que realiza un cambio en el valor de par torsor igual en magnitud pero en sentido contrario al ejecutado por el reductor 6 y así, finalmente, regresar al sistema multiplicador/tren de engranajes, el cual se encarga de cerrar el circuito de potencia mecánica en el banco de pruebas.

El dispositivo 13 para la variación de la carga consiste en dos discos en forma de flanches, con una serie de agujeros radiales que, de acuerdo con su montaje, se encargan de modificar el momento torsor en el eje 12, que comunica los reductores 11 y 14 (figura 5). Este acople posee doce agujeros con cuatro posiciones distintas del acople o dispositivo de carga y puede producir desfases angulares discretos, entre ejes, de 1° , 2° y 3° . Si se mantiene inmóvil uno de los discos del acoplamiento y se gira el segundo hasta la alineación de las perforaciones en los dos flanches, se logra el incremento secuencial del par de transmisión. Esto es posible mediante el uso de una placa de carga.

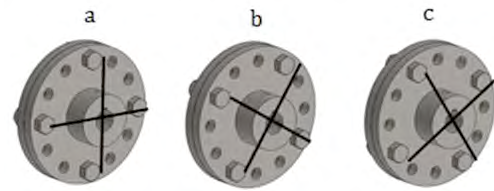


Figura 5. Esquemas de disposición relativa de los orificios en los acoples para realizar la carga del par en el banco.

El reductor 6 se encarga de disminuir la velocidad de rotación a una razón de 35 y aumentar el par torsor en igual medida, proveniente del sistema multiplicador/tren de engranajes. Este reductor bascula sobre una base para permitir el libre movimiento de reacción ejercido en el reductor (figura 6). Para cuantificar este par torsor en el reductor cilíndrico helicoidal se usa una báscula digital.

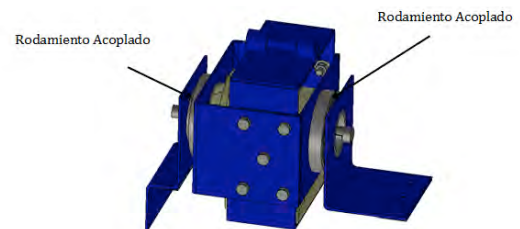


Figura 6. Reductor de dientes helicoidales oscilante.

Se realizaron los cálculos cinemáticos y dinámicos de los pares dentados, se determinó el diámetro de los ejes conectados a los pares multiplicadores, considerando la flexibilidad necesaria para la precarga, la resistencia mecánica dinámica y de fatiga. Conociendo los valores de las fuerzas tangenciales necesarias para alcanzar el par máximo a las mayores revoluciones especificadas por el fabricante de los reductores, se tradujeron estos datos a valores de par exterior, para aplicarlos en los platos de acople del eje de retorno. Se calcularon los elementos de acople y carga estática, junto con la instrumentación para medir el par reactivo y la velocidad media e instantánea de las ruedas. Se diseñó la estructura de soporte, que se montó sobre ruedas para facilitar su desplazamiento en el laboratorio y para aislar las posibles vibraciones generadas en el banco; igualmente, se consideraron criterios de facilidad de ensamble y servicio, rigidez, resistencia y compatibilidad con la instrumentación. La figura 7 muestra la configuración final del banco construido.



Figura 7. Foto del banco de pruebas construido.

La medición del par se realiza mediante un medidor digital de fuerza (celda de carga); la medición de la velocidad en la transmisión de los engranes P1, P3 y E2 (figura 8) se realiza con sensores infrarrojos de corto alcance CNY70; la adquisición de los datos se hace a través de un osciloscopio FLUKE 125.

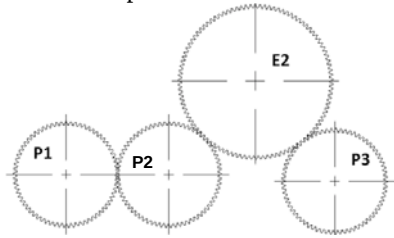


Figura 8. Disposición de los dos piñones P1 y P2 de los ramales de entrada, acoplados a la rueda E2 accionada por el motor.

Mediciones preliminares en el banco de pruebas

Los sensores se instalaron para medir no solo las revoluciones de los ejes externos de la transmisión, sino para visualizar las variaciones angulares, de manera que se puedan computar las velocidades instantáneas de las ruedas. Para ilustrar esta prestación del banco, en las gráficas de la figura 9 se reproducen los comportamientos de las salidas de los sensores frente a los dentados de la rueda de salida del motor E2, y de los piñones de los ramales P1 y P3, para los tres estados de carga: en vacío (deformación de precarga de 0°) y precargas correspondientes a deformaciones de 1° y 2° sobre el sistema de acople de carga. Los valores de los pares de torsión y las velocidades angulares promedio se pueden leer en las tablas 1, 2 y 3.

Los resultados presentados corresponden a mediciones *preliminares* y se presentan en este trabajo para plenitud en la información del trabajo hasta ahora realizado. Debe anotarse que actualmente continúan realizándose ajustes de procedimiento y se están elaborando los protocolos de utilización del banco.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el diseño y construcción de un banco de ensayos de trenes de engranajes. Se adoptó la configuración de lazo de recirculación de potencia de tipo mecánico. En el diseño se han previsto las máximas cargas esperadas a partir de las especificaciones del motor y de las relaciones de transmisión de los pares multiplicadores y de los reductores cónicos. Las magnitudes por medir incluyen las velocidades angulares de los engranajes de los pares multiplicadores, así como el par de torsión a la salida del reductor ensayado. Esta información es útil para la estimación de las pérdidas mecánicas en el sistema, en función de la potencia transmitida y de las velocidades en los ramales. El banco se convierte en una valiosa herramienta, tanto para la investigación como para el aprendizaje, en el campo del diagnóstico de transmisiones dentadas.

En futuros trabajos se espera presentar resultados de utilización plena del banco, tras realizar estudios de desempeño de los reductores y, particularmente, estudios de valoración del rendimiento mecánico, concepto poco abordado en la enseñanza del diseño mecánico, a pesar de su gran incidencia en el gasto energético. Otra aplicación importante del banco será la comparación del desempeño de las transmisiones al operar con diferentes lubricantes, y la caracterización de los modos de desgaste.

Piñón 1 - Engranaje 2				
n_1 (rpm)	n_2 (rpm)	Fuerza (N)	Momento torsor (Nm)	
2651,1	1750,7	0	0	
Engranaje 2 - Piñón 3				
n_2 (rpm)	n_3 (rpm)	Fuerza (N)	Momento torsor (Nm)	Potencia (W)
1750,7	2619,2	0	0	0
Piñón 1 - Piñón 3				
n_1 (rpm)	n_3 (rpm)	Fuerza (N)	Momento torsor (Nm)	Potencia (W)
2603,5	2651,1	0	0	0

Tabla 1. Datos experimentales, correspondientes al estado no deformado del sistema.

Piñón 1 - Engranaje 2				
n_1 (rpm)	n_2 (rpm)	Fuerza (N)	Momento torsor (Nm)	
2557,5	1771,8	16	1,71	
Engranaje 2 - Piñón 3				
n_2 (rpm)	n_3 (rpm)	Fuerza (N)	Momento torsor (Nm)	Potencia (W)
1755.9	2603.5	15	1.61	12.5

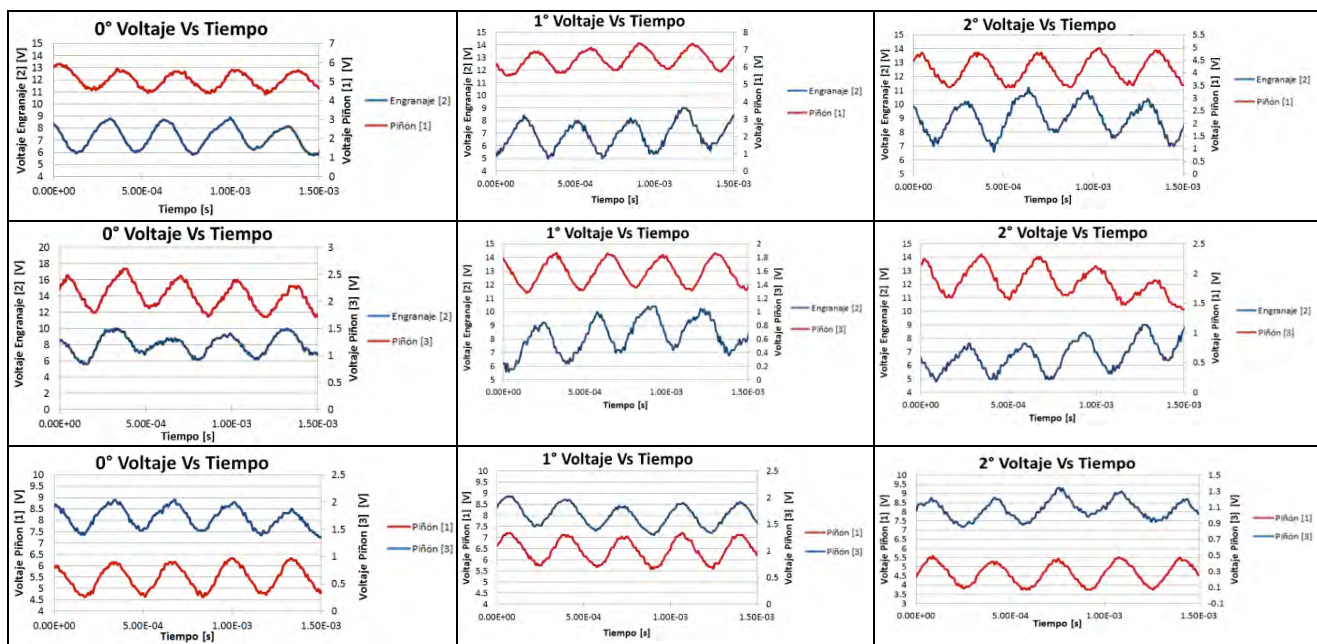
Piñón 1 - Piñón 3				
n_1 (rpm)	n_3 (rpm)	Fuerza (N)	Momento torsor (Nm)	Potencia (W)
2611,3	2627,1	16	1,71	13,5

Tabla 2. Datos experimentales, correspondientes a 1° de desfase en el acople de carga.

Piñón 1 - Engranaje 2				
n_1 (rpm)	n_2 (rpm)	Fuerza (N)	Momento torsor (Nm)	
2588,0	1740,3	29	3,10	
Engranaje 2 - Piñón 3				
n_2	n_3	Fuerza	Momento	Potencia

(rpm)	(rpm)	(N)	torsor (Nm)	(W)
1750,7	2588,0	28	2,99	23,3
Piñón 1 - Piñón 3				
n_1 (rpm)	n_3 (rpm)	Fuerza (N)	Momento torsor (Nm)	Potencia (W)
2603,5	2651,1	27	2,90	23,1

Tabla 3. Datos experimentales, correspondientes a 2° de desfase en el acople de carga.



(a) Eje sin retorcer

(b) Deformación de 1°

(c) Deformación de 2°

Figura 9. Variaciones de las señales de los sensores ubicados en los piñones de los ramales y en la rueda instalada en el motor.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. N. Ivanov, *Elementos de máquinas*, Moscú: Escuela Superior, 1984.
- [2] J. Croes, S. Iqbal, *Literature survey: gear losses. Energy software tools for sustainable machine design. EC 7th. Framework Programme –Theme ICT*. www.estomad.org.
- [3] T. Petry-Johnson, “Experimental investigation of spur gear efficiency,” M.Sc. thesis, The Ohio State Univ., Columbus, Ohio, 2007.
- [4] S. Seetharaman, “An investigation of load-independent power losses of gear systems,” Ph. D. thesis, The Ohio State Univ., 2009.
- [5] S. M. Sánchez, “Modelo de cálculo resistente de engranajes cilíndricos de alto grado de recubrimiento”, Tesis doctoral, Universidad Pontificia de Comillas, Madrid, 2013.
- [6] IP 334: Determination of Load Carrying Capacity of Lubricants, FZG Gear Machine Method.
- [7] CEC L-07-A-95: Load Carrying Capacity Test for Transmission Lubricants, FZG Gear Machine.
- [8] A. Mihailidis, I. A. Nerantzis, “New system for testing gears under variable torque and speed,” *Recent Patents on Mechanical Engineering* 2009, 2, 179-192. Bentham Science Publishers Ltd., Thessaloniki, Greece.
- [9] M. Åkerblom, Gear test rig for noise and vibration testing of cylindrical gears. Volvo construction

- equipment components, 1997, Disponible en: www.diva-portal.org.
- [10] J. I. Pedrero, "Determination of the efficiency of cylindrical gear sets", en *Proc. 4th World Congress on Gearing & Power Transmission*, Paris, March 1999.
- [11] R. G. Abreu, R. J. L. Moya, E. J. Vélez, P. A. Velázquez, Máquinas y equipos para el ensayo de transmisiones por engranajes. Disponible en: www.monografias.com/trabajos-pdf4.
- [12] M. D. Moorhead, "Experimental investigation of spur gear efficiency and the development of a helical gear efficiency test machine," M. Sc. thesis, The Ohio State Univ., Columbus, Ohio, 2007.
- [13] T. A. Szweda, "An experimental study of power loss of an automotive manual transmission", M. Sc. thesis, The Ohio State Univ., Columbus, Ohio, 2008.
- [14] P. Žák, V. Dynybyl, "Innovative analysis and documentation of gear test results", *Gear Technology Magazine*, September/October 2008.
- [15] T. Petry-Johnson, A. Kahraman, N. E. Anderson, y D. R. Chase, "An experimental investigation of spur gear efficiency", *ASME J. Mech. Des.*, vol. 130, 2008.
- [16] V. Dobrovolsky, *Elementos de máquinas*, Moscú: Editorial MIR, 1976.
- [17] D. W. Dudley, *Manual de engranajes*, México: Continental, 1980.
- [18] ISO 6336-2 Calculation of Load Capacity of Spur and Helical Gears, Part 2: Calculation of Surface Durability (Pitting), 2008.
- [19] ISO 6336-3 Calculation of Load Capacity of Spur and Helical Gears, Part 3: Calculation of Tooth Bending Strength, 2008.
- [20] J. L. Moya, R. A. Goytisoló, A. E. Hernández, A. S. Machado, "Simulación del contacto en transmisiones por engranajes", presentado en el VIII Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Cuzco, 2007.

ESTUDIO DE LA VARIACIÓN DE LA RUGOSIDAD Y LA DUREZA SUPERFICIAL EN PIEZAS TORNEADAS CON ASISTENCIA DE ELECTROPLASTICIDAD

Study of surface roughness and hardness in workpieces machined by a turning process assisted by electroplasticity

RESUMEN

Se presentan los resultados de un trabajo experimental destinado a determinar la variación de la rugosidad y la dureza superficial de algunos metales (aluminio 6061, latón SAE 41 y acero SAE 1020), al ser torneados en presencia de electropulsos. En el experimento diseñado se dejaron constantes los parámetros de maquinado (velocidad angular, avance y profundidad de corte), y se variaron los parámetros eléctricos (frecuencia y ancho de pulso); no obstante, solo en una región de las probetas se aplicaron los electropulsos. Se encontró que al asistir el torneado con electroplasticidad se mejoraron los acabados superficiales y disminuyeron ligeramente las durezas superficiales, lo cual permite pensar en que con estos desarrollos se abre una línea de investigación.

Palabras clave: dureza superficial, electroplasticidad, rugosidad superficial, torneado.

ABSTRACT

The results of an experimental study aimed at determining the variation of surface roughness and hardness of some metals (6061, Brass SAE 41 and SAE 1020 steel), being turned with the assistance of electropulsing are presented. In the designed experiment, the machining parameters (angular speed, feed and depth of cut) were kept constant while the electrical parameters (frequency and pulse width) were varied; only in one region of the workpiece the electropulses were applied. It can be concluded that the electrically-assisted turning process improves surface finish, and surface hardness is reduced slightly. The results can open an interesting line of research to pursue.

Keywords: Electroplasticity, surface hardness, roughness surface, turning.

CARLOS A. MONTILLA M.

Ingeniero mecánico, M.Sc.
Profesor Titular
Universidad Tecnológica de Pereira
cmontilla@utp.edu.co

ANTONIO J. SÁNCHEZ E.

Ingeniero mecánico, M.Sc.
Estudiante de doctorado
Universitat Politècnica de Catalunya
antonio.egea@upc.edu

HERNÁN A. GONZÁLEZ R.

Ingeniero mecánico, Ph.D.
Profesor Agregado
Universitat Politècnica de Catalunya
hernan.gonzalez@upc.edu

VALENTINA KALLEWAARD

Ingeniero mecánico, Ph.D.
Profesor Titular
Universidad Tecnológica de Pereira
valentin@utp.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La creación y aplicación de procesos de manufactura amigables, desde el punto de vista del consumo energético y de la generación y disposición de los residuos finales ([1], [2] y [3] y [4], todas de 2011), marcan tendencias actuales de desarrollo sostenible en el maquinado. En la búsqueda de estos procesos, muchos investigadores han realizado esfuerzos importantes en la creación de procesos híbridos, que comprenden procesos convencionales PC y no convencionales PNC.

Como ejemplo de procesos híbridos novedosos se encuentran estudios con resultados muy interesantes en los campos de fresado de carburo de silicio (SiC) asistido con descargas eléctricas ([5] 2011), procesos de rectificado y acabado electroquímico aplicados en torneado ([6] 2008), diseño de acabado superficial de formas libres en acabado electroquímico asistido por

bruñido ([7] 2007), y nuevos usos de corrientes y campos eléctricos en el procesamiento por metalurgia de polvos metálicos ([8] 2000).

El torneado de piezas asistido con pulsos de corriente de alta densidad es un proceso nuevo que podría formar parte de los procesos híbridos (combinación de corte y arranque de viruta con asistencia de un proceso electrofísico) y cumpliría además con los enfoques de sostenibilidad, puesto que de él se espera, entre otras ventajas frente al torneado convencional, el mejoramiento del acabado superficial y la disminución de la potencia necesaria para el corte.

El fenómeno de la electroplasticidad modifica las propiedades mecánicas de los materiales [9], en particular la tasa de deformación plástica, y alrededor de esta aseveración se plantean las siguientes hipótesis:

- La deformabilidad de un material se puede mejorar transitoriamente en un proceso de torneado asistido por electroplasticidad, modificando los valores de densidad de corriente, y la frecuencia y duración de los pulsos de corriente eléctrica.
- El acabado superficial y la dureza del material mejoran con la aplicación de la electroplasticidad.

El presente trabajo tiene por objetivo estudiar la influencia que tiene sobre la rugosidad y dureza superficial, en piezas mecanizadas en torno, la asistencia del proceso con pulsos de corriente de alta densidad y corta duración.

2. ANTECEDENTES

Desde el año 1963 fue descubierto experimentalmente el fenómeno de *electroplasticidad* ([9] 1963), es decir, la modificación de las propiedades mecánicas de un metal cuando es expuesto simultáneamente a pulsos intermitentes de corriente de alta densidad J y a un esfuerzo mecánico σ (tracción, compresión, torsión).

Con la electroplasticidad se mejora la formabilidad de un material, puesto que los pulsos conllevan la aparición del efecto *Joule* y efectos de campo magnético y eléctrico, los cuales propician el desplazamiento de las *dislocaciones* de la estructura cristalina del metal (deformación plástica), es decir, se disminuyen el esfuerzo de fluencia del material σ_f y el esfuerzo a la rotura σ_r . Así, cuando el material es sometido a un esfuerzo mecánico se deforma más fácil y rápidamente que en ausencia de los pulsos J .

Para el estudio de la electroplasticidad, típicamente los investigadores han utilizado un arreglo físico como el que se muestra en la figura 1.

En esta figura se aprecia el generador de pulsos con sus respectivos selectores de parámetros, la probeta o espécimen que se va a estudiar, el equipo para esforzar mecánicamente la probeta (tracción en este caso) y la instrumentación para registrar los parámetros de salida del proceso. Como se puede inferir, se trata de un complejo fenómeno de carácter termo-electro-mecánico.

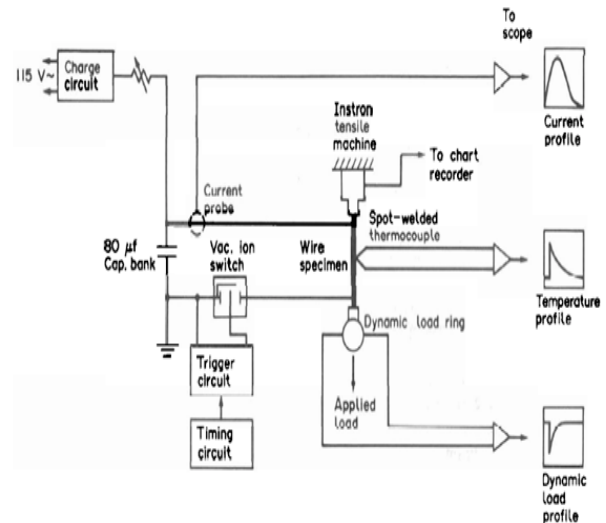


Figura 1. Esquema general de arreglo para estudio de la electroplasticidad [10].

La electroplasticidad comenzó a ser investigada activamente en el mundo desde 1980 y hoy en día se encuentran numerosos estudios teórico-experimentales que dan cuenta de que su aplicación mejora las condiciones de formabilidad del material y las propiedades finales del mismo (Referencias [10] 2012 hasta [27] 2000).

Se conocen diversos modelos físico-matemáticos, que abarcan desde modelos lineales hasta complejos modelos integro-diferenciales, como el propuesto por Kukudzhniov y Kolomiets-Romanenko ([12] 2011), que tiene en cuenta el carácter termo-electro-mecánico de un espécimen cuando es sometido simultáneamente a electroplasticidad y a una carga puntual; sin embargo, incluso este modelo dista mucho de la compleja situación que ocurre en un proceso de torneado asistido con electroplasticidad.

3. EXPERIMENTACIÓN

La configuración básica del experimento desarrollado tuvo como punto de partida el arreglo mostrado en la figura 1, y se ajusta a un esquema general como el mostrado en la figura 2.

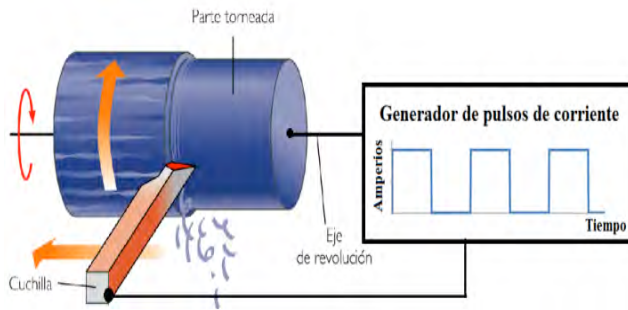


Figura 2. Vista general de transformador, generador de pulsos y multímetro Fluke.

Para este trabajo se utilizaron los siguientes equipos e instrumentos de medición:

- Torno revólver ZPS.
- Generador de pulsos (figura 3). Permite la modificación de las variables eléctricas (duración y frecuencia de los pulsos). El rango de frecuencias es de 100 Hz a 400 Hz, y la duración de los pulsos puede ser 50, 100, 150 ó 200 μ s.
- Transformador de 230V primario, 60V secundario y potencia de 300W (figura 3).
- Cámara termográfica Wuhan Guide TP8S.
- Osciloscopio portátil Fluke 123 (figura 3).
- Rugosímetro Mitutoyo SJ 201.
- Durómetros Wekstoffprüfmaschinen y Wilson Wolpert.
- Barras de acero SAE 1020, de aluminio 6061 y latón SAE 41, con diámetros de 25 mm.
- Calibrador pie de rey y flexómetro.
- Portainsertos MTJNR-2525 M16 e insertos TNMG-16 para acero, latón y aluminio.

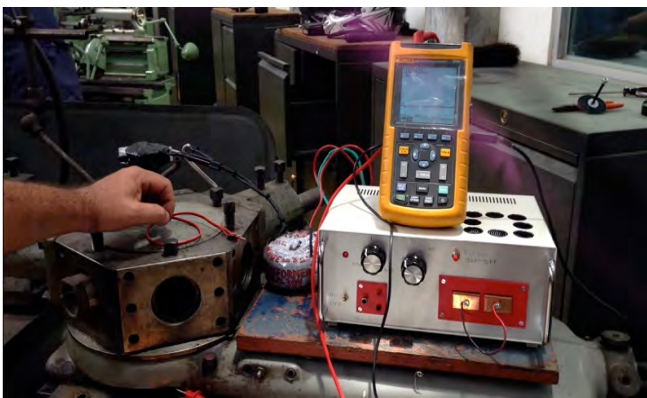


Figura 3. Esquema del proceso asistido por pulsos de corriente.

Se realizó un diseño de experimentos en el cual:

1. Se definieron, como parámetros de entrada constantes, la velocidad angular de la probeta (una para cada material), la profundidad de pasada y la longitud por

mecanizar. La tabla 1 muestra los valores de los parámetros de entrada.

Tabla 1. Parámetros de entrada del experimento.

Material	Vel. husillo (rpm)	Avance (mm/rev)	Profundidad (mm)
6061 Al	1130	0,046/0,127	0,5
SAE 41	1130	0,046/0,127/ 0,254/0,356	0,5
SAE 1020	420	0,046/0,127/ 0,254/0,356	0,5

2. Se realizaron combinaciones de las condiciones de corte, así: cuatro velocidades de avance diferentes, dos anchos de pulsos diferentes y dos frecuencias de pulso. Con base en estas combinaciones se establecieron doce ensayos, con una probeta por ensayo. Adicionalmente, para cada probeta se definieron dos zonas: en la mitad de la longitud de la probeta no se aplicaría la electroplasticidad y en la otra mitad sí se usaría. En la tabla 2 se muestran las variables eléctricas del experimento. En el caso particular de la densidad de corriente J , ha sido calculada bajo el supuesto de que el área del material es rectangular y constante.

Tabla 2. Parámetros eléctricos del experimento.

Material	Densidad de corriente J (A/mm ²)	Duración de pulso (μ s)	Frecuencia (Hz)
6061 Al	[3913-1417]	50 / 200	100 / 300
SAE 41	[3913-506]	50 / 200	100 / 300
SAE 1020	[3913-506]	50 / 200	100 / 300

3. Durante el experimento se tomaron lecturas de la temperatura instantánea de la superficie cortada (figura 4), utilizando la cámara termográfica.

4. Luego de la ejecución del experimento se tomaron lecturas de dureza Rockwell y Brinell, y de rugosidad superficial (R_a , R_z), en las dos regiones de las probetas: sin EPT y con EPT.

5. Por último, se procesó y graficó la información y se analizaron los resultados obtenidos.

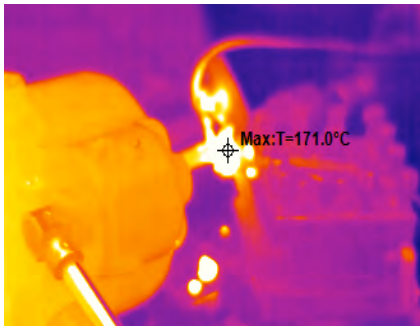


Figura 4. Toma de temperaturas de la probeta con cámara termográfica TP8S, durante el experimento

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados obtenidos luego de la realización de la parte experimental se muestran en las figuras 5 a 10. Como se muestra en las primeras (las números 5, 6 y 7), el fenómeno de la electroplasticidad tiene un efecto favorable desde el punto de vista del acabado superficial final; en todos los materiales ensayados la rugosidad promedio Ra (líneas continuas) y rugosidad máxima pico-valle Rz (líneas discontinuas) es inferior en la zona donde se aplicaron los pulsos de corriente de alta densidad.

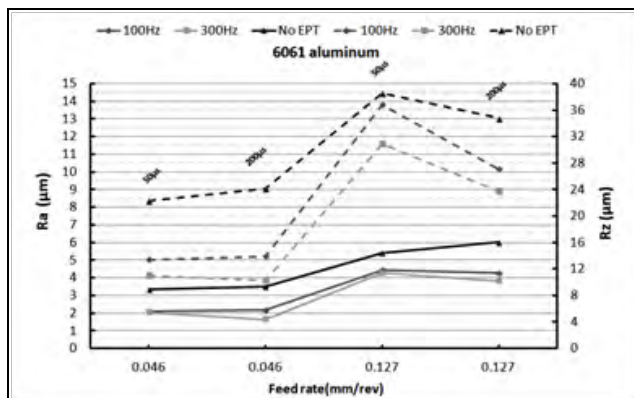


Figura 5. Gráfica de rugosidad Ra y Rz versus avance, para aluminio 6061.

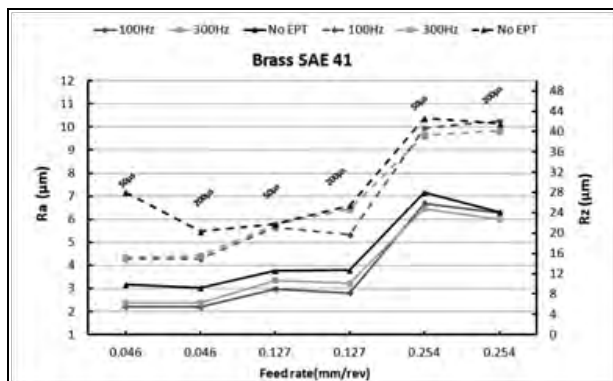


Figura 6. Gráfica de rugosidad Ra y Rz versus avance, para latón SAE 41.

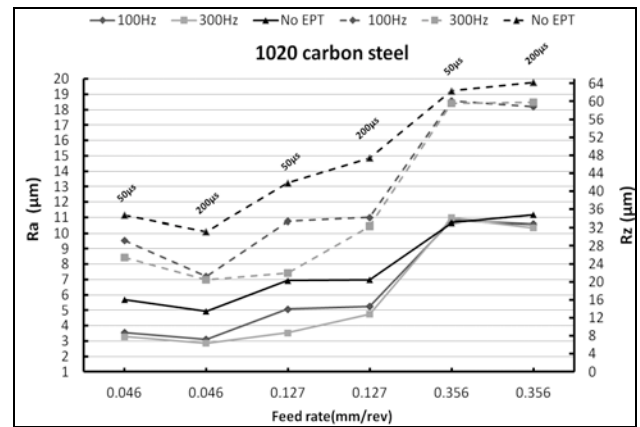


Figura 7. Gráfica de rugosidad Ra y Rz versus avance, para acero SAE 1020.

- En el caso del aluminio 6061, solamente se pudo trabajar a dos velocidades de avance de las inicialmente planteadas (0,046 y 0,127 mm/rev). Para las otras dos velocidades de avance, y dado que se trata de un material de elevada plasticidad, aparecía filo recrecido en la superficie de la pastilla y se notaba claramente el deterioro drástico del material.
- En cuanto a la dureza superficial, para el caso del aluminio 6061 se nota que, contrariamente a lo esperado, esta aumenta en la región donde se aplicaron los pulsos de corriente de alta densidad (figura 8). Esta situación probablemente se deba a que el aluminio es un material muy blando y es posible que con el mecanizado se presente endurecimiento por deformación o, alternatively, que con las temperaturas alcanzadas con la aplicación de EPT se presente algún tipo de tratamiento superficial.

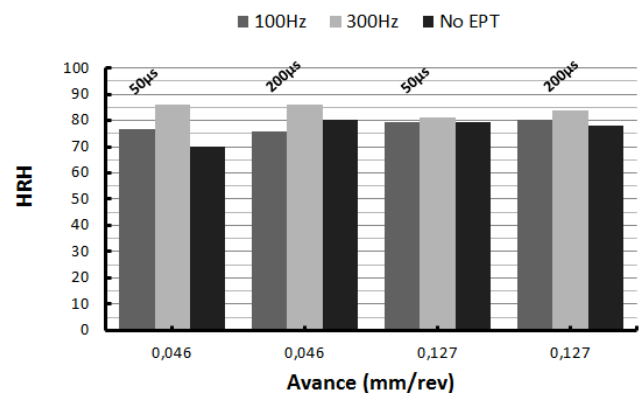


Figura 8. Variación de la dureza superficial, con EPT y sin EPT, a diferentes avances, frecuencias y ancho de pulso, para aluminio 6061.

- Para el latón SAE 61 y para el acero SAE 1020, el comportamiento observado indica que de manera general hay disminución de la dureza (respecto al

material sin EPT), en las zonas afectadas con pulsos de corriente de alta densidad (figuras 9 y 10).

- En el caso del latón SAE 41, para los tres avances estudiados, e independientemente del ancho de pulso (50 μ s o 200 μ s) se observa que la dureza es mayor para la frecuencia de 100 Hz que para la de 300 Hz (figura 9).
- En el caso del acero SAE 1020, para los tres avances estudiados, e independientemente del ancho de pulso (50 μ s y 200 μ s) se observa como comportamiento general que la dureza sin EPT es mayor que la dureza a 300 Hz y esta a su vez es mayor que la de 100 Hz (figura 10).

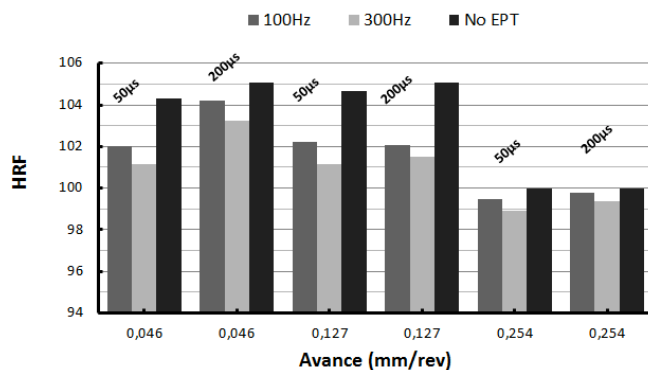


Figura 9. Variación de la dureza superficial, con EPT y sin EPT, a diferentes avances, frecuencias y ancho de pulso, para latón SAE 41.

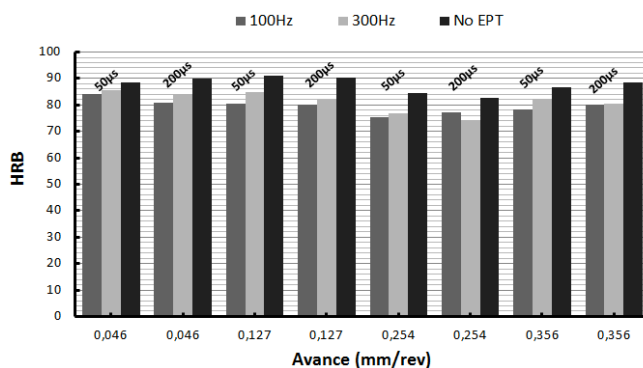


Figura 10. Variación de la dureza superficial, con EPT y sin EPT, a diferentes avances, frecuencias y ancho de pulso, para acero SAE 1020.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De los resultados obtenidos hasta la fecha se puede concluir lo siguiente:

Se hizo uso exitoso del generador de pulsos de corriente de alta densidad, y con él se pudo minimizar el efecto

Joule, ya que se inducen pulsos que están en el orden de microsegundos (μ s).

Se definió un protocolo de medición y visualización de resultados para el torneado asistido por electroplasticidad, el cual se podrá tomar como base para fases posteriores del estudio que se continuará realizando y permitirá integrar valores experimentales a los análisis teóricos posteriores.

Los resultados mostraron que en las regiones de las probetas en las que se aplicó el torneado asistido con EPT hay una mejora en el acabado superficial. Este comportamiento fue repetible para los tres materiales estudiados. Se hizo una comparación de estos resultados con lo obtenido por Zhang [28] en un experimento similar y se observaron comportamientos análogos en cuanto a la influencia de la EPT en la mejora de la rugosidad superficial.

Las mejoras más importantes en el acabado superficial (hasta del 46% en el aluminio) se presentaron para los avances menores de 0,046mm/rev y los anchos de pulso altos de 200 μ s, mientras que las más bajas mejoras (tan solo 2% en acero 1020) se presentaron para los avances altos –de 0,254mm/rev– y anchos de pulso bajos de 50 μ s. Los valores referenciados corresponden a los promedios obtenidos para las frecuencias de 100 Hz y 300 Hz.

Los resultados mostraron que en las regiones de las probetas en las que se aplicó el torneado asistido con EPT, hay una reducción en la dureza superficial del material, en latón y acero, mientras que para el aluminio ocurrió justamente lo contrario. Esto quizá suceda debido a que los pulsos de corriente han afectado las tensiones residuales superficiales y/o incluso a la estructura metalográfica de los metales; estos puntos serán objetivos de un próximo estudio de investigación.

Los resultados de este primer estudio no permiten avizorar la existencia de un modelo general de comportamiento para los diferentes materiales en cuanto a las posibles relaciones entre las variables de entrada (avance, ancho de pulso, frecuencia de excitación) respecto a las variables de salida esperadas (rugosidad superficial y dureza).

Con base en lo expuesto, se prevé que hay un largo estudio teórico-experimental por llevar a cabo, antes de obtener modelos generales de comportamiento del fenómeno de torneado asistido por el efecto de la electroplasticidad.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] W. Li, A. Zein, S. Kara, y C. Christoph, "Investigation into fixed energy consumption of machine tools", *Proceedings of the 18th CIRP International 268 Conference on Life Cycle Engineering*, Technische

Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, May 2nd – 4th 2011, pp. 268–273

[2] I. S. Jawahir, y A. D. Jayal, “Product and process innovation for modeling of sustainable machining processes”. Institute for Sustainable Manufacturing, *Proceedings of the 8th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, University of Kentucky, Lexington, USA. 2011, pp. 299–305.

[3] R. Neugebauer, R. Wertheim, y C. Harzbecker, “Energy and resources efficiency in the metal-cutting industry”, Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology, Chemnitz, Germany. Faculty of Mechanical Engineering, Institute for Machine Tools and Forming Technology, Technical University Chemnitz, Germany. 2011, pp. 247–257.

[4] M. F. Rajemi, P.T.A. Mativenga, A. Aramcharoen, “Sustainable machining: selection of optimum turning conditions based on minimum energy considerations”. School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, The University of Manchester. *Journal of Cleaner Production* 18, 2010, pp. 1059–1065.

[5] R. Ji, Y. Liu, Y. Zhang, X. Dong, Z. Chen, y B. Cai, “Experimental research on machining characteristics of SiC ceramic with end electric discharge milling”, *Journal of Mechanical Science and Technology* 25 (6), 2011, pp. 1535–1542.

[6] P. S. Pa, “Design of continuity processes of electrochemical finishing and grinding following turning”. *Journal of Mechanical Science and Technology* 22. 2008, pp. 2197–2202.

[7] P. S. Pa, “Design of freeform surface finish using burnishing assistance following electrochemical finishing”. *Journal of Mechanical Science and Technology* 21. 2007, pp. 1630–1636.

[8] D. C. Newman, “Novel uses of electric fields and electric currents in powder metal (P/M) processing”. *Elsevier. Materials Science and Engineering A* 287. 2000, pp. 198–204.

[9] O. A. Troitskii, y V. I. Likhtman, “The effect of the anisotropy of electron and radiation on the deformation of zinc single crystals in the brittle state”. *Akaciemiya Nauk SSSR*. 1963, vol. 147 no. 4, pp. 814–820.

[10] A. F. Sprecher, S. L. Mannan, y H. Conrad Overview no. 49. “On the mechanisms for the electroplastic effect in metals”. Materials Engineering Department, North Carolina State University, Raleigh, NC 27695-7907, U.S.A. 1986, pp. 1145–1162.

[11] C. Li, S. Jiang, y K. Zhang, “Pulse current-assisted hot-forming of light metal alloy”. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, U. K. 2012, pp. 931–938.

[12] V. N. Kukudzhanov, y A. V. Kolomiets-Romanenko, “A model of thermo-electroplasticity of variations in the mechanical properties of metals based on defect structure reorganization under the action of pulse electric current”. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences, *Izvestiya Akademii Nauk. Mekhanika Tverdogo Tela*. 2011, vol. 46 No. 6, pp. 814–827.

[13] V. N. Kukudzhanov, y A. V. Kolomiets-Romanenko, “Study of the influence of electric current dynamical action on mechanical properties of materials with ordered structure of defects”, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences, *Izvestiya Akademii Nauk. Mekhanika tverdogo Tela*, no. 3. 2010, vol. 45, No. 6, pp. 465–475.

[14] A. R. Velikhanov, “Electroplasticity of undoped and doped silicon”, Institute of Physics, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, ul. 26 Bakinskikh Komissarov 94, Makhachkala, 367003 Dagestan, Russia. 2010, Vol. 44, No. 2, pp. 145–148.

[15] S. A. Barannikova, M. V. Nadezhkin, y L. B. Zuev, “On the localization of plastic flow under compression of NaCl and KCl crystals. Defects and impurity centers, dislocations, and physics of strength”, Institute of Strength Physics and Materials Sciences, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. *Fizika Tverdogo Tela*. 2009, Vol. 51, No. 6, pp. 1081–1086.

[16] S. To, Y. H. Zhu, W. B. Lee, X. M. Liu, Y. B. Jiang, y G. Y. Tang, “Effects of current density on electropulsing-induced phase transformations in a Zn–Al based alloy”. *Applied physical A. Materials Science & Processing*. 2009, pp. 939–944.

[17] V. E. Peletskii, V. D. Tarasov, y B. A. Shur, “Parameters of the polymorphic transformation in VT1-0 alloy in heating and cooling cycles”. Joint Institute of High Temperatures, Russian Academy of Science. *Metally*, No. 3, Russia. 2009, No 3, pp. 107–112.

[18] V. V. Stolyarov, U. Kh. Ugurchiev, I. B. Gurtovaya, y S. D. Prokoshkin, “Alloys with shape memory effect. Increase in the deformability of coarse-grained tin alloy rolled with superimposition of pulse current”. *Metal Science and Heat Treatment* Vol. 50, Nos. 3–4, 2008. Traducido de *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*. 2008, Vol. 50, No. 3–4, pp. 132–135.

[19] S. V. Konovalov, V. I. Danilov, L. B. Zuev, R. A. Filipev, y V. E. Gromov, “On the influence of the electrical potential on the creep rate of aluminum”. Siberian State Industrial University. Russia Institute of

Strength Physics and Material Sciences, Siberian Division, Russian Academy of Sciences. *Fizika Tverdogo Tela*. 2007, vol. 49, No. 8, pp. 1389–1391.

[20] M. E. Twigg, R. E. Stahlbush, M. Fatemi, S. D. Arthur, J. B. Fedison, J. B. Tucker, y S. Wang, “Partial dislocations and stacking faults in 4H-SiC PIN diodes”. *Journal of Electronic Materials*. 2004, vol. 33, No. 5, pp. 472–476.

[21] W. Zhang, Z. Zhou, M. L. Sui, G. H. He, J. D. Guo, y D. X. Li, “Formation of nanoscale α -Al in a superdralumin under high current density electropulsing”. Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, People’s Republic of China. *Journal of Materials Science Letters* 21, 2002, pp. 1923–1925.

[22] B. C. Valek, “Electromigration-induced plastic deformation in passivated metal lines”. *Applied Physics Letters*. January 2002, pp. 1–13.

[23] H. Conrad, y D. Yang, “Influence of an electric field on the plastic deformation of fine-grained MgO at high homologous temperatures”. Department of Materials Science and Engineering, North Carolina State University. June 2000, pp. 4045–4052.

[24] N. G. Dariavach, y J. A. Rice, “Electromigration and the electroplastic effect in aluminum SiC MMCs”. *Powder Materials Research Summary*. January 2000, pp 40–42.

[25] H. Conrad, “Electroplasticity in metals and ceramics”. *Materials Science and Engineering Department*. Elsevier A287. 2000, pp 276–287.

[26] A. A. Bychkov, y D. N. Karpinskii, “Influence of constant current on the formation of a neck in a porous bar subjected to tension”. *Strength of Materials*. 2000, vol. 32, No. 3, pp. 277–285.

[27] H. Conrad, “Space charge and the dependence of the flow stress of ceramics on an applied electric field”. Materials Science and Engineering Department, North Carolina State University. USA. 2000, vol. 44, No 2, pp. 311–316.

[28] D. Zhang, S. To, Y. Hua, H. Wang, y G. Tang, “Static electropulsing-induced microstructural changes and their effect on the ultra-precision machining of cold-rolled AZ91 alloy”. *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2011*, Volume 43A, April 2012, pp. 1341–1346.

DISEÑO MECÁNICO DE SISTEMA ROBÓTICO MODULAR RECONFIGURABLE

Mechanical design of a self-reconfigurable robotic modular system

RESUMEN

La robótica modular es un área de estudio relativamente nueva que propone una nueva manera de analizar, diseñar y construir robots, basada en la afirmación que los sistemas constituidos por muchas piezas simples pueden ser más efectivos que los robots tradicionales. El objetivo de este paper es diseñar mediante un enfoque mecatrónico un robot para búsqueda y rescate urbano (USAR, por sus siglas en inglés). El diseño se basó en dos aspectos: lograr que los módulos pudieran actuar como robots móviles independientes, y darles la habilidad de poder acoplarse entre ellos de manera autónoma. El diseño final, denominado MECABOT, muestra un módulo con seis caras que ofrecen la posibilidad de acoplar módulos en ellas, que puede moverse libremente en los tres grados de libertad del plano (desplazamiento en dos dimensiones y rotación respecto a un eje perpendicular al plano) usando sus cinco grados de movilidad, identificar y comunicarse con otros módulos y evitar obstáculos.

Palabras clave: proceso de diseño, robótica y automatización, sistemas multi-agentes, robots móviles.

ABSTRACT

Modular robotics is a relatively new study area that proposes a new way to analyze, design and build robots, based on the statement that systems constituted by many simple components can be more effective than traditional robots. The aim of this paper is to design, using a mechatronic approach, an Urban Search And Rescue (USAR) robot. The design was based on two aspects: accomplish that modules could act as independent mobile robots, and give them the ability to engage others autonomously. The final design, called MECABOT, shows a six attachable faces module that can move freely in all three degrees of freedom of the plane (displacement in two dimensions and rotation about an axis perpendicular to the plane) using its five degrees of mobility, identify and communicate with other modules and avoid obstacles.

Keywords: mobile robots, multi-robot systems, process design, robotics and automation.

1. INTRODUCTION

The design of a robot depends largely of the function that it will perform, but when it is about modular robots, and especially modular self-reconfiguring systems, this is not the principal concern because one of the promises of this robotic area is that the device could adapt itself to the environmental conditions. As it is said by [1], the promises of modular robotics lie in three characteristics of these robots: robustness, versatility and low cost. Precisely the versatility of the self-reconfiguring robots is the characteristic that allows to unconcern about the kinds of locomotion that modular robots must be able to perform to move properly in any terrain [2]

However, this relief is only momentary, because actually an issue still remains, not at the design of a complete robot, but in designing the characteristics of the

fundamental piece of this kind of systems: the module. According to the design, characteristics and capabilities of the modules, the whole system will be able to do something or other. For this reason it is important to determine the amount and types of modules that the system will have. Namely, which characteristics must have each module in order to the whole system fulfills its task? How many types of modules are necessary? Will all of them have the same characteristics? How many modules are necessary for each locomotion configuration? All these questions, and others, should be answered during the design and construction of a robotic modular system.

In a traditional robot that is designed to accomplish only one function, the space inside it can be used to distribute adequately all the necessary electronic devices, which are focused to only one goal. Although, when it is talk about

CAMILO ANDRÉS HURTADO ERASSO

Ingeniero en Mecatrónica
Asistente de Investigación
Grupo de investigación DAVINCI
Universidad Militar Nueva Granada
camiloandresh@ieee.org

ÓSCAR GERARDO RUBIANO MONTAÑA

Ingeniero en Mecatrónica
Asistente de Investigación
Grupo de investigación DAVINCI
Universidad Militar Nueva Granada
oscar.rubiano@ieee.org

RICARDO ANDRÉS CASTILLO ESTEPA

Magíster en Ingeniería Mecánica
Investigador
Grupo de investigación DAVINCI
Universidad Militar Nueva Granada
ricardo.castillo@unimilitar.edu.co

a modular robot and its characteristics of versatility and robustness, and who can perform multiple functions, the available space inside each module becomes an important factor because the module should be as small as possible, but also should have enough capabilities to meet its promise of versatility.

The same occurs with the mechanical design of the module. While a robot built with a traditional approach has a mechanical design focused to accomplish only one function and one kind of locomotion, modular robots are supposed to be prepared to change at any time to a new configuration that allows them to overtake obstacles.

Generally, ability to self-reconfigure requires a significant space into the module, and electronic capabilities would add more space requirements, and therefore more size and weight to the final design, reducing the module's capacity of moving in small and narrow spaces, and increasing the requirements of motors and batteries.

The reflection mentioned above implies that it is not entirely true that for modular robots does not matter the environmental conditions in which the system is going to perform; it is necessary consider them, because they determine the abilities that must have the whole system, and therefore, each module, and abilities are related with the design and space inside them, and these factors are limited. It is impossible for each module to perform many and multiple capabilities. It is not the same a modular system that is going to perform under ocean that other one that is going to play an important role in outer space, or other whose mission is to find survivors amid disasters. This also indicates that is quite possible that modular systems, in most cases, should be *n*-modular, with *n* higher than 1, that is to say, that exist different types of modules, each one with varied abilities, in order to design simple and small modules for general purpose and others with specific functions.

The organization of this paper is as follows: chapter 2 treats the state of the art and other modular robotic projects that show similar module designs; chapter 3 explain the mechanical design of MECABOT module, its forms of locomotion and the docking process between modules; chapter 4 shows the final results of the project, including the devices that make up each module and design restrictions; chapter 5 shows conclusions and recommendations for future work, and finally chapter 6 gives the references used.

2. RELATED WORK

Modular robots may adopt several forms and mobility degrees. Some opt for cube designs with no joints, like CUBLI [3], or sphere modules with no joints and with equatorial rotation, like ATRON [4]. However, modules like MTRAN [5], with two or more mobility degrees are

the ones that seem to have more utility for USAR missions.

The ideal design for this kind of modules includes an active connection system, namely, that the robotic modular system can self-reconfigure itself. This ability is essential in moments when the system should overcome different obstacles or terrains by its own. Active designs might use magnetic force, with magnets, electromagnets, electrostatic forces, mechanical latches, or even a combination of some of them. This docking system is an essential part of a robotic modular system, because it defines the possible configurations set, both to self-reconfigurable systems as to manual-reconfigurable ones.

A successful docking system should be simple, fast and secure; it should be symmetric, namely, that modules do not have to be in a special position to perform the coupling; it should be not only a mechanical attach, but also includes electric and information interchange; it must consider the uncertainty in positioning when modules are going perform a coupling; modules should be able to auto align with each others; the position of the sensor that allows the alignment and attachment should be secure; the docking mechanism should be simple and stable, and should not be necessary maintain energized the connection to hold the coupling. [6]

3. MECHANICAL DESIGN OF THE MODULE

The design presented in this paper meets the basic requirements that a robot for search and rescue missions has to fulfill during an operation. When a urban disaster occurs, either natural or not, such as an earthquake, a tsunami, a twister, or a terrorist attack, the initial minutes and hours are very important to save survivors. However, the danger that debris represents for rescuers causes that rescue operations take too much time, more than survivors can bear. This is the reason for which robot rescuers are useful at these situations. Many authors even say that groups of rescuers robots must be heterogeneous, that is to say, that include aerial vehicles for terrain recognition, strong terrestrial robots that can move debris, and small and agile robots that can reach survivors and indicate their locations [7]

The USAR robot designed, called MECABOT, has modules which consist of two linked semi-modules. Both of them almost have the same sensors and actuators. They only differ in the XBEE module and in a central servomotor. There is only one of them per module, as can be seen in Figure 1 where they have dotted lines.

Each semi-module has the following elements: one gearmotor that moves the *side wheel*, one servomotor that moves the *pivot*, magnets to guide and engage modules during the docking process, hall effect sensors to detect when modules are ready to perform the dock, distance

sensors to detect obstacles and other modules, infrared transceivers to communicate with other modules at short distances and a docking system with a conical gearbox and holding latches.

The modular system presented here belongs to the kind of USAR robots adequate for narrow spaces. Their modules are small, which allow them to surpass obstacles and wriggle among debris for reach survivors and indicate their locations. They have an adjustable autonomy that allows them to make some tasks, like avoid obstacles and docking with others, but always with the possibility to be commanded by humans in case of a situation that be risky for a human life.

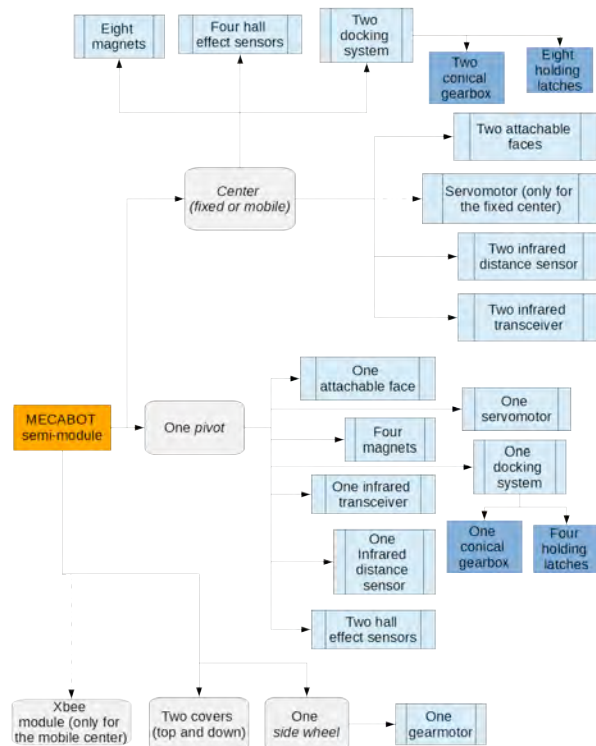


Figure 1. Module components

The capabilities of this kind of robots may be multiple and varied, but the more abilities they have, the better results will be got, because their performance will be closer to the one of a human and their response in crucial moments will be more accurate. Although, more abilities in each module implies more space, size and weight, and as it was said before, the dimensions and speed of these robots are important skills to take into account for its further performance. Equally, ease of use and cost of these systems are factors that have to be considered if it is wanted that these robots may be used in real disaster situations, in order to allow that rescue and security groups may purchase them and learn how to use them quickly [8]

The sensors needed for a USAR robot may be classified in two broad categories: the ones that are required for control the robot, and the ones that are necessary to identify survivors and victims. Besides, main characteristics that are recommended for a useful USAR robot are: high mobility, durable energy source, simple architecture, high versatility, reliability and low expense [9]

With all these remarks, MECABOT is so far a system that can find people under debris and indicate their location, but it cannot yet provide first aid, remove rubble or take them to surface. Its characteristics are:

- Each module may act as an independent mobile robot or as a part of a modular system
- It has five degrees of mobility which allow it to move freely in the three dimensions of plane.
- It has a self-reconfiguring modular architecture that allows it to shape various configurations.
- Each module has two kinds of communication with the outside world: the first one to recognize other modules and make the coupling process, and another one to send and receive information from other modules or human control
- Modules are designed to seek each other and proceed with self-reconfiguration
- Each module may identify obstacles

MECABOT modules have six attachable surfaces, as in Figure 2. All the surfaces are symmetric, they have the same amount and distribution of elements (sensors and actuators), so it does not matter the orientation of the module that is going to attach.

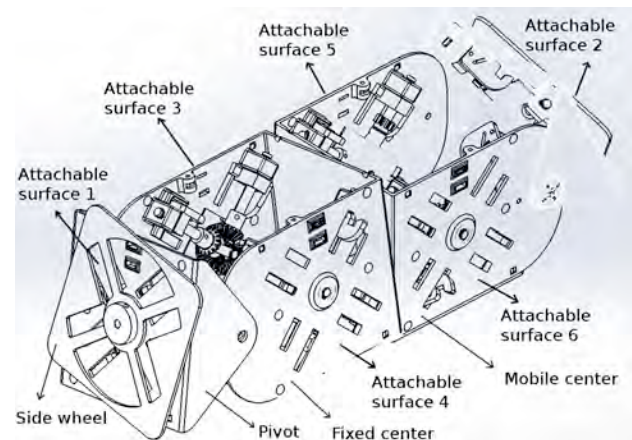


Figure 2. Outline of MECABOT module

As it is indicated by Figure 2, the main mechanical parts of a MECABOT semi-module are: the *pivot*, the *center* and the *side wheel*.

Pivots and *side wheels* of both semi-modules are equal, but the *centers* have a little difference between them. One of the *centers* has a servomotor that allows modules to

rotate at its middle. *Pivots* are the pieces that allow modules to move in one direction over the plane, that is, they give to modules their characteristic of independent mobile robot. They can rotate 120 degrees. *Side wheels* are the pieces that allow modules to move in a second direction over the plane, perpendicular to the direction allowed by *pivots*. These *side wheels*, that can continuously rotate, also allow modules to change its orientation about an axis perpendicular to the plane where modules are located.

3.1 Mobility and freedom degrees

As the objective was the design of a terrestrial USAR robot to find quickly survivors after a disaster, it was chosen a modular system since it offers better capabilities with regard to overtaking obstacles. But then a lot of questions arise: will the modules be able to move individually? Or they only will be able to move attached to others? How many mobility degrees will they have? This number of mobility degrees how will affect the freedom degrees of the module? And of the system?

As the purpose of the robot is the search and rescue of survivors in disaster areas, it is necessary that each module may move individually, because this way the modular system could become in many smaller modular robots, covering a larger area. This means that each module of the system must be a MAU - Motion Atomic Unit -, that is to say, a unit capable of move without being attached to another one.

According to [10], regarding to modular systems with pitch and yaw connections, exist two minimal configurations that allows a module to be a MAU. They are the Pitch - Pitch (PP) and Pitch - Yaw - Pitch (PYP) configurations. Hence, a module built with two pitch joints, or a module with two pitch and one yaw joints, is a MAU. And why it is so important to though in minimal configurations of modular robots? Because according to [2] the fewer modules has a configuration, the most energy efficient it is.

The configuration chosen for MECABOT was a PP, with several modifications, which are shown in Figure 3. A PP configuration, as the one developed by [11], allows a module, and therefore a whole system, to move only in a straight line. To reduce the above mentioned movement restriction, the first change made to the PP configuration is the addition of side wheels that gives modules the possibility to move in a direction perpendicular to the one allowed by pivots [12].

The second modification to the PP configuration was the addition of a mobility degree at the middle of the module[13], so that modules may change between PP configuration and Pitch-Yaw (PY) configuration. A PY configuration is not useful when the module behaves as an independent mobile robot, in fact it inhibits the

module displacement, but it confers new forms of displacement when several modules are coupled.

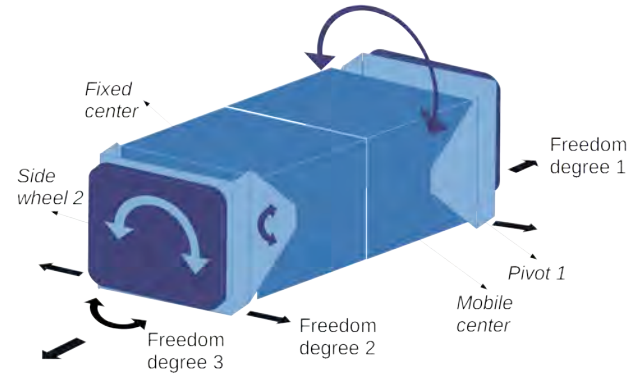


Figure 3. Outline of the freedom and mobility degrees of MECABOT module

3.2 Docking system between modules

The docking system is based on MTRAN[14], where a series of holding latches are activated by mean of a conical gearbox. In the system presented by MTRAN, the driver gear is activated by motors, which means that each attachable face needs a motor to work.

This mode of operation implies that a module with six attachable faces needs six motors to implement its docking system, without having into account the other motors that the module may need for its movement.

The design presented in this paper includes the change of the motors at the docking system, and replace them with shape memory alloy actuators, specifically Nickel Titanium alloy (NiTi), also known as nitinol. This alloy is a material that changes its shape when it experiences a temperature shift. When it is heated, it “remembers” its form and reduces its length. For this reason, it is possible to use this material to replace motors and generate the necessary strength to move the conical gearbox [15]

When the driver gear moves, four elements that support the latches begin to move towards the center of the face, causing the latches emerge to surface, as in Figure 4.

Each one of the six attachable faces have eight holes, four for receive latches from the module that is going to couple, and four through which its own latches, that engage also the other module, get out. The dock occurs from both sides, to increase the security level of the connection. The holes and latches are shown in Figure 5.

The docking process between two modules occurs when they must form a structure with better locomotion capabilities.

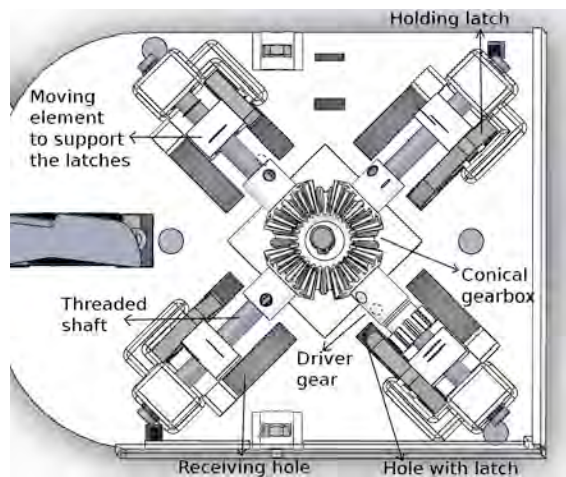


Figure 4. Docking system detail between modules.

In those cases, modules seek each other using their communication devices. When a module detects something with its distance sensor, decides if it is an obstacle or another module through its infrared transceiver. When both modules have determined that they have encountered with another module, they approach towards each other, and by mean of their hall effect sensors, identify the adequate distance to perform the coupling.

Figure 5 shows two coupled modules by its *end faces*, or *pivots*. It can be also observed how the linkage is made by both modules, with four latches per side. The distance between coupled modules is 8 mm.

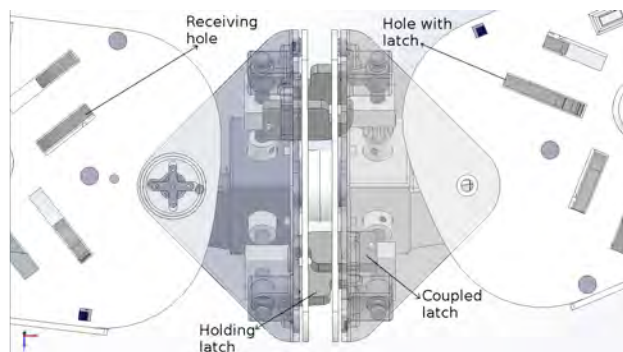


Figure 5. Two coupled modules.

4. RESULTS

MECABOT module can be observed at Figure 6. It can behave as an independent mobile robot and as a part of a robotic modular system with mechanical abilities to self-reconfigure. Each semi-module measures 163 mm length, 100 mm width and 104 mm height, and attachable faces have an area of a 100 mm square. The complete module measures 326 mm length, and its mechanical system and structure weigh 900 g. approximately, without having

into account electronic devices. It is expected that the entire module with all its components weights 1.2 Kg, approximately.

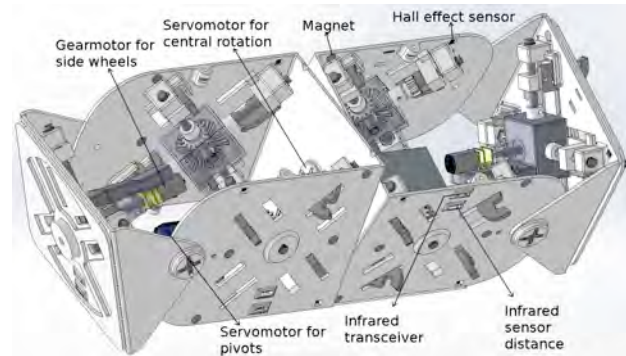


Figure 6. Parts of MECABOT module

The central servomotor chosen has a 1.6 Kg-cm torque, which is adequate to move a whole module. The gearmotors for *side wheels* have a 1Kg-cm torque, and *pivot* servomotors have a 2.6 Kg-cm torque, which is enough to move at least two attached modules.

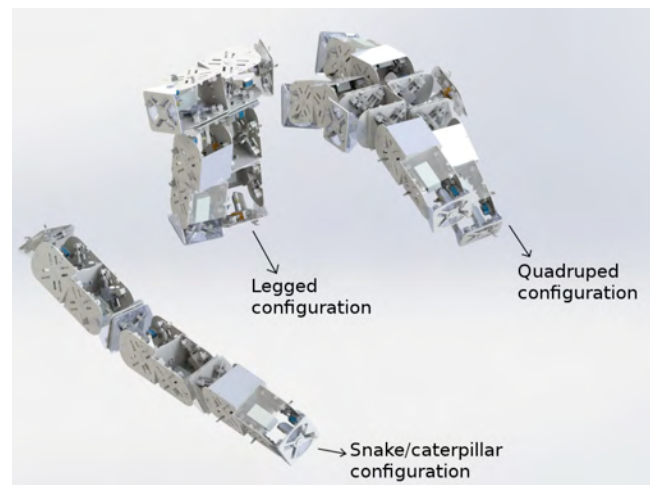


Figure 7. Different locomotion configurations with MECABOT modules

The chosen communication system for cooperative work was Zigbee protocol, with XBEE module, but the communication at the docking process, that is to say, when modules are close to each other, is made using an infrared transceiver, because it ensures that modules are near, which cannot be confirmed easily by XBEE module. The docking process also includes the operation of hall effect sensors and small circular magnets at each attachable face, which indicates when modules are at the appropriate distance to perform the coupling.

As can be seen in Figure 7, the designed modules enable to make several locomotion configurations, that include module chains, which means snake, caterpillar and wheel movements [16], as other configurations, such as quadruped and legged.

It also should be said that MECABOT modules present some operation and assembly restrictions. Even though modules have six attachable faces, they cannot dock among themselves in any way. They only can join up between their *end faces* (*attachable faces* 1 and 2 at Figure 2.), and between their *end faces* and *lateral faces* (*attachable faces* 3,4,5,6 at Figure 2). They cannot attach between their *lateral faces*. In addition, *pivots* cannot rotate 180 degrees, which limits some movements.

5. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

The mechanical design of the module is almost the most important aspect of the whole robotic modular system, because the performance of that will condition in a large degree the performance of the entire robot.

It has not been found any mechanical design of modules equal to MECABOT. It should be mentioned that the module presented here gathers characteristics of many modules looked at literature.

In mechanical designs similar to this one, where it is used a *pivot* to allow the module to move, the total length of the module conflicts with the length of the *pivot*. It is important that the latter has enough length to allow the module to move quickly, but it is also important that the whole module do not be too much long. When *attachable faces* are not the same *pivots*, like in the presented design, it is not possible that *pivots* rotate a wide angle when a module has others coupled to their *lateral faces*, because its *pivots* will hit the docked modules.

The mechanical design presented here allows perform many locomotion configurations, like *snake*, *caterpillar*, *wheel*, and others that are not module chains, like *quadrupeds*.

Acknowledgment

This project was funded by Universidad Militar Nueva Granada under investigation project ING 1528.

6. REFERENCES

- [1] M. Yim, Y. Zhang, y D. Duff, «Modular robots», *IEEE Spectr.*, vol. 39, n.º 2, pp. 30-34, 2002.
- [2] M. Yim, «Locomotion with a unit-modular reconfigurable robot», Stanford, 1994.
- [3] M. Gajamohan, M. Merz, I. Thommen, y R. D'Andrea, «The Cubli: A cube that can jump up and balance», en *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2012, pp. 3722-3727.
- [4] M. W. Jorgensen, E. H. Ostergaard, y H. H. Lund, «Modular ATRON: modules for a self-reconfigurable robot», en *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2004. (IROS 2004). Proceedings*, 2004, vol. 2, pp. 2068-2073 vol.2.
- [5] K. T. Haruhisa Kurokawa, «Distributed Self-Reconfiguration of M-TRAN III Modular Robotic System», *J Robot. Res.*, vol. 27, pp. 373-386, 2008.
- [6] D. Mândru, I. Lungu, y O. Tatar, «Connection Mechanisms for Modular Self-Reconfigurable Robots», *Acta Tech. Napoc. Ser. Appl. Math. Mech.*, vol. 50, pp. 139-144, 2007.
- [7] R. Ventura y P. U. Lima, «Search and Rescue Robots: The Civil Protection Teams of the Future», en *2012 Third International Conference on Emerging Security Technologies (EST)*, Lisbon, Portugal, 2012, pp. 12-19.
- [8] A. Davids, «Urban search and rescue robots: from tragedy to technology», *IEEE Intell. Syst.*, vol. 17, n.º 2, pp. 81-83, 2002.
- [9] D. S. Ignatova y R. K. Oransky, «Mechatronic approach to investigations of rescue operations», en *MECHATRONIKA, 2011 14th International Symposium*, 2011, pp. 103-108.
- [10] J. González Gómez, «Robótica modular y locomoción: aplicación a robots ápodos.», Universidad Autónoma de Madrid, 2008.
- [11] S. Murata, E. Yoshida, A. Kamimura, H. Kurokawa, K. Tomita, y S. Kokaji, «M-TRAN: self-reconfigurable modular robotic system», *IEEEASME Trans. Mechatron.*, vol. 7, n.º 4, pp. 431-441, dic. 2002.
- [12] G. G. Ryland y H. H. Cheng, «Design of iMobot, an intelligent reconfigurable mobile robot with novel locomotion», en *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2010, pp. 60-65.
- [13] B. Salemi, M. Moll, y W.-M. Shen, «SUPERBOT: A Deployable, Multi-Functional, and Modular Self-Reconfigurable Robotic System», en *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2006, pp. 3636-3641.
- [14] A. Sproewitz, M. Asadpour, Y. Bourquin, y A. Ijspeert, «An active connection mechanism for modular self-reconfigurable robotic systems based on physical latching», en *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008*, 2008, pp. 3508-3513.
- [15] N. B. Kha y K.-K. Ahn, «Position Control of Shape Memory Alloy Actuators by Using Self Tuning Fuzzy PID Controller», en *2006 1ST IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2006, pp. 1-5.
- [16] C. Hurtado Erasso, Ó. Rubiano Montaña, y R. Castillo Estepa, «Design and simulation of a reconfigurable modular robot», presentado en *22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013)*, Ribeirao Preto, SP, Brazil, 2013, pp. 7703 - 7714.

ALGORITMOS MEMÉTICOS: UN COMPENDIO

A Survey on Memetic Algorithms

RESUMEN

Los algoritmos meméticos son metaheurísticas híbridas, compuestas por una técnica de búsqueda global tipo poblacional, en combinación sinérgica con algoritmos específicos de búsqueda local, que a su vez pueden ser exactos o estocásticos. Si bien originalmente su uso se enfocó a casos de optimización dura de tipo combinatorio, hoy en día existe una amplia gama de desarrollos con meméticos destinados a resolver problemas de tipo numérico con o sin restricciones, mono o multiobjetivo, estáticos o dinámicos. En este trabajo se presenta un compendio de los algoritmos meméticos, desde sus orígenes hasta sus tendencias futuras, incluyendo un recuento de sus principales aplicaciones actuales.

Palabras clave: algoritmos meméticos, búsqueda local, diseño en ingeniería, metaheurísticas, optimización dura.

ABSTRACT

Memetic algorithms are hybrid metaheuristics that are formed by the synergistic combination of a global search population-based technique with specific algorithms of local search, which in turn can be exact or stochastic. In spite of their use was focused originally to hard optimization cases of combinatorial type, today there is a wide selection of memetic developments to solve numerical type problems, with or without constraints, mono or multi objective, static or dynamic. In this work, a survey on memetic algorithms is presented, from their origin to their future tendencies, including a revision of their principal applications nowadays.

Keywords: engineering design, hard optimization, local search, memetic algorithms, metaheuristics.

1. INTRODUCCIÓN

Sin pérdida de generalidad, el problema de optimización se puede definir matemáticamente como

$$(\text{minimizar/maximizar}) f_n(\mathbf{x}) \quad (1)$$

donde $\mathbf{x}$ es el vector de variables de diseño con dimensión m y $f_n(\mathbf{x})$ representa una función objetivo; cuando $n = 1$ el problema es mono-objetivo mientras que para $n > 1$ es multiobjetivo, en cuyo caso se busca la mejor solución para el conjunto de funciones por maximizar y minimizar. Además, si el problema está sujeto a (2) y (3) se dice que tiene restricciones:

$$g_j(\mathbf{x}) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (2)$$

$$h_k(\mathbf{x}) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (3)$$

donde $g_j(\mathbf{x})$ y $h_k(\mathbf{x})$ son las restricciones de desigualdad y de igualdad, respectivamente. El espacio de búsqueda o de decisión S está definido por los límites $L_m < x_m < U_m$

EDUARDO VEGA-ALVARADO

Sistemas Digitales, M. Sc.

Alumno Ph. D.

Universidad Autónoma de Tlaxcala

evega@ipn.mx

ÉDGAR ALFREDO PORTILLA-FLORES

Ingeniera eléctrica, Ph. D.

Profesor investigador

Instituto Politécnico Nacional

aportilla@ipn.mx

PAOLA ANDREA NIÑO-SUÁREZ

Ingeniera eléctrica, Ph. D.

Profesor investigador

Instituto Politécnico Nacional

pminos@ipn.mx

LETICIA FLORES-PULIDO

Ciencias de la computación, Ph. D.

Profesora investigadora

Universidad Autónoma de Tlaxcala

aicitel.flores@gmail.com

ÉRIC SANTIAGO-VALENTÍN

Ingeniería en Sistemas, Pregrado

Alumno M. Sc.

Instituto Politécnico Nacional

e.santiag.valentin@gmail.com

para cada variable de diseño; si S es un conjunto discreto el problema es de tipo combinatorio, en caso contrario es de optimización numérica [1]. Finalmente, la región factible F del espacio S es el conjunto con las soluciones que satisfacen todas las expresiones en (2) y (3) [2].

En una gran variedad de problemas, y específicamente en las aplicaciones del mundo real, no siempre es posible obtener una solución óptima aplicando técnicas clásicas, tales como los métodos numéricos o el análisis gráfico. Así, la categoría de *optimización dura* incluye todos aquellos problemas que, cuando se usan métodos determinísticos, no pueden resolverse de manera óptima o hasta un límite garantizado, en un tiempo aceptable [3].

Las metaheurísticas son algoritmos ideados para resolver de manera aproximada una gama amplia de problemas duros de optimización, usando técnicas de prueba y error. Una metaheurística tiene como características generales el estar inspirada en procesos naturales o artificiales, el usar componentes estocásticos (involucrando variables aleatorias) y el tener una serie de parámetros que deben ajustarse al problema por resolver [4].

Las metaheurísticas basadas en población parten de un conjunto inicial de soluciones o individuos propuestos, para buscar el valor o los valores óptimos; existen dos grupos generales en estos algoritmos: computación evolutiva e inteligencia de cúmulos. Las tareas principales en las metaheurísticas modernas son la diversificación (exploración) y la intensificación (explotación) [5]; las técnicas basadas en población realizan una buena exploración pero su explotación por lo general es deficiente [4]. Para solventar esta debilidad se han propuesto diversas alternativas, dentro de las cuales se destaca la de los algoritmos meméticos (MAs), que combinan la dinámica de búsqueda global de las metaheurísticas de población con refinamientos de búsqueda local (LS), para obtener un método híbrido de solución adecuado al problema específico, que incluye diversas heurísticas y algoritmos exactos [2], [6].

El objetivo de este trabajo es presentar un panorama general de los MAs, ya que por su capacidad estos métodos se han convertido en una alternativa importante para la solución de problemas de optimización, y cuya flexibilidad les permite abarcar prácticamente cualquier campo de la ingeniería. Para ello, el trabajo está organizado de la siguiente manera: la Sección 2 incluye una breve descripción de los MAs, desde su origen, evolución y modelo básico hasta su clasificación general en híbridos simples y adaptivos; en la Sección 3 se analizan algunos desarrollos actuales y las tendencias futuras de desarrollo; y por último, en la Sección 4 se presenta una discusión final con las conclusiones.

2. ALGORITMOS MEMÉTICOS

2.1 Evolución

Los primeros trabajos sobre algoritmos híbridos datan de finales de 1980, y su desarrollo fue paralelo al afianzamiento de los algoritmos evolutivos [4], [7]; al mismo tiempo se dio un auge de la computación evolutiva y comienzan a trabajarse nuevas ideas para mejorar su rendimiento, una vez conocidas sus limitaciones.

En 1989, P. Moscato [8] propone los algoritmos meméticos, que simulan el proceso de evolución cultural derivado de la teoría evolutiva de Lamarck y del concepto del *meme*, presentado por R. Dawkins como el análogo del *gen* en la evolución natural; así surgen los MAs como un método más general basado en la combinación de algoritmos de búsqueda global y local, y se constituyen en una nueva filosofía de optimización [9]. En el contexto de la computación, los memes corresponden a patrones recurrentes del mundo real o a conocimientos específicos, codificados para la solución efectiva de problemas [10], y corresponden a los bloques de construcción del *saber hacer* cultural transmisible y replicable [11].

Muchos de los primeros trabajos en computación memética eran híbridos simples entre búsquedas basadas en población y procedimientos de refinamiento, conocidos con nombres como “algoritmos meméticos”, “algoritmos lamarckianos”, “búsqueda local genética” o “algoritmos evolutivos híbridos” [11], [12]. Inicialmente los MAs fueron vistos con desconfianza por su naturaleza metaheurística, especialmente por ser métodos de solución aproximada, pero a finales de los años 1990 comenzó su aplicación recurrente. En la última década han sido utilizados para la solución de un rango amplio de problemas, que incluyen optimización combinatoria y numérica, optimización mono y multi-objetivo, optimización con restricciones y optimización dinámica [2], [13], [14], [15]. Con respecto a las aplicaciones en el mundo real, se destacan la seguridad informática y el criptoanálisis [16], los sistemas de control [17], la planificación de tareas y el enrutamiento [18], y la clasificación de datos [19], entre otras.

En la evolución de los algoritmos meméticos se pueden destacar tres etapas [6]:

1. Las aplicaciones combinan un algoritmo evolutivo y un método especializado de búsqueda local.
2. Aparece el concepto de multimemes y se amplían los desarrollos al uso de cualquier algoritmo de población como técnica base de la búsqueda global.
3. Se incorporan mecanismos explícitos de aprendizaje, lo cual permite un uso más frecuente y confiable de métodos exactos en tándem para la búsqueda local.

Si bien la tercera etapa de esta evolución está actualmente en desarrollo, se debe mencionar que debido a las ya mencionadas flexibilidad y capacidad de los MAs, se siguen diseñando aplicaciones correspondientes a las etapas 1 y 2, sin menoscabo de la eficiencia en el desempeño obtenido y mejorando en general el rendimiento de las metaheurísticas simples utilizadas previamente.

2.2 Modelo básico y variantes

El algoritmo 1 corresponde al modelo básico de un MA; en él se consideran algoritmos generales para las búsquedas global (línea 8) y local (líneas 6 y 10). A partir del algoritmo básico se ha diseñado un gran número de MAs, diferentes entre sí en por lo menos uno de los siguientes puntos:

- Metaheurística de población utilizada como base.
- Algoritmo aplicado para la LS (técnicas exactas o aproximadas, número de memes por utilizar).
- Condiciones y frecuencia de renovación para la búsqueda local (nivel de hibridación, número de soluciones consideradas para mejora, frecuencia e intensidad de la LS, etc.) [11], [20].

Aunque la mayor parte de la computación memética utiliza algoritmos evolutivos, cada vez son más comunes las aplicaciones en las que se han tomado como base las metaheurísticas de inteligencia de cúmulos, tales como la optimización por cúmulo de partículas (PSO) [19], la colonia artificial de abejas (ABC) [21], la búsqueda armónica (HS) [22] o el enjambre de luciérnagas (FF) [23]. Por ello, el número y tipo de los parámetros del algoritmo de búsqueda global cambian de acuerdo con la implementación (línea 2); de igual forma se modifican las condiciones de paro (líneas 2 y 7), y se puede optar por un número máximo de generaciones/ciclos, un tiempo límite o un error mínimo (ϵ).

```

1 inicio
2  determinar tamaño_población,
   máximo_generaciones, gen_actual = 0;
3  determinar parámetros propios del algoritmo;
4  iniciar_población (P);
5  evaluar (P);
6  búsqueda_local (P);
7  mientras (gen_actual < máximo_generaciones)
8    búsqueda_global (P);
9    evaluar (P);
10   búsqueda_local (P);
11   gen_actual = gen_actual + 1;
12 fin_mientras
13 fin

```

Algoritmo 1. Modelo básico de un MA

2.3 Búsqueda local

Los algoritmos de búsqueda local parten de un conjunto de soluciones (llamadas *agentes* en el caso de los MAs) generadas de manera aleatoria o por medio de algún algoritmo específico, que iteran para realizar transiciones con los vecinos de la configuración actual. La idea es encontrar mejores poblaciones y convertirlas en la siguiente configuración o, en caso contrario, conservar el conjunto actual de soluciones. El algoritmo 2 muestra el modelo general para un procedimiento de búsqueda local [24].

```

función búsqueda_local (actual)
1 inicio
2 repetir
3   nuevo = buscar_vecino (actual);
4   si  $f(\text{nuevo}) < f(\text{actual})$ 
5     actual = nuevo
6   fin_si
7 hasta criterio_terminación

```

8 regresar actual

9 fin

Algoritmo 2. Modelo general de un procedimiento de LS

El concepto de *vecindario* tiene una gran importancia para la LS ya que representa el área de búsqueda para la mejora individual. En los casos de optimización combinatoria, esta zona está formada por el conjunto de soluciones a las que se puede llegar por un cambio unitario en el individuo actual, mientras que en los problemas de tipo continuo o numérico es un conjunto denso compuesto por un número infinito de puntos, por lo que debe establecerse una estrategia de modificación para encontrar aquellos que se consideren como vecinos [25]. La localización de vecinos (línea 3, algoritmo 2) puede realizarse de manera estocástica o determinística, buscando solo uno o un conjunto de ellos.

Encontrar un buen equilibrio entre los componentes de las búsquedas global y local es uno de los principales objetivos de diseño en un MA y puede verse como un proceso de optimización per se. Por la manera como se compone un algoritmo memético y como se implementa la LS, se observa que la igualdad $MA = EA + LS$ es incorrecta, dado que ambas búsquedas están interrelacionadas y no se contemplan como etapas independientes [7]. Como se indica en el algoritmo 1, en la mayoría de implementaciones con meméticos se realiza una etapa de búsqueda local, inmediatamente después de generar la población inicial.

La LS puede integrarse al ciclo del algoritmo de población en los siguientes puntos, tal como se muestra en la figura 1 [12], [25]:

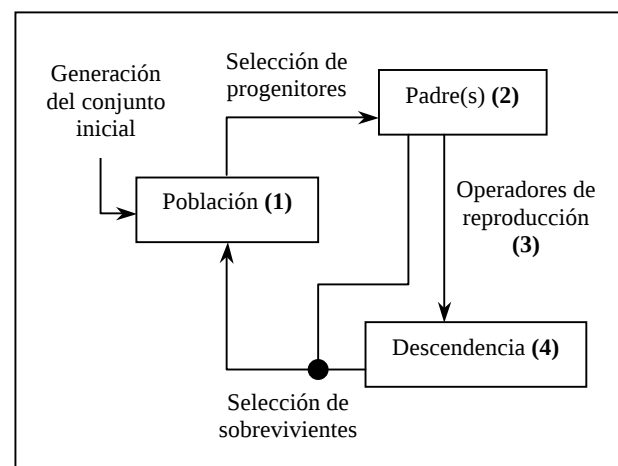


Figura 1. Etapas posibles de integración de la LS en el ciclo del algoritmo de población

1. Sobre la población, para simular el desarrollo cultural que se transmitirá a las generaciones

siguientes (incluyendo el conjunto inicial de agentes).

2. Sobre el padre o padres seleccionados, antes de la reproducción.
3. Durante la generación de las nuevas soluciones, para producir un descendiente perfecto.
4. Sobre el descendiente, antes de que se realice el concurso para determinar la sobrevivencia de este o de su antecesor.

Como se observa en la figura 1, dependiendo de la ubicación y de la cantidad de etapas de LS, el MA puede adquirir mayor robustez y mejorar su rendimiento. En este proceso interviene una serie de parámetros de configuración de la LS, cuyo manejo e implementación constituyen factores que determinan la clasificación de los MAs.

2.4 Clasificación de los algoritmos meméticos

En general, de acuerdo con su nivel de hibridación, los MAs pueden clasificarse en híbridos simples o canónicos e híbridos adaptivos [26]. Los híbridos simples se caracterizan por un conocimiento a priori del dominio del problema por resolver, el cual se incorpora al algoritmo durante su diseño y presenta un comportamiento totalmente estático; a pesar de corresponder a la primera generación de MAs, los híbridos simples aún gozan de gran popularidad por su facilidad de implementación, especialmente por el uso, como base, de algoritmos genéticos tales como el GA o la DE.

Por su parte, los híbridos adaptivos adquieren información en el momento de su ejecución (aprendizaje), por lo que son capaces de reconfigurar sus parámetros e incluso sus operadores de acuerdo con las circunstancias para *adaptarse* al problema específico [11]. Entre los puntos clave por considerar en el diseño de un MA adaptivo están la frecuencia de los refinamientos o búsquedas locales, la selección de los subconjuntos de individuos por considerar para la LS, la intensidad de los refinamientos, y la selección de los procedimientos para realizar dichas mejoras [14], [21].

3. LÍNEAS DE DESARROLLO FUTURO DE LOS ALGORITMOS MEMÉTICOS

A partir de su aparición, las metaheurísticas han tenido un avance muy significativo; sin embargo, su aplicación principal ha sido la de resolver problemas idealizados, y han trabajado en pocas ocasiones con situaciones del mundo real. En el caso de los MAs, esta situación es aún más evidente, a pesar de contar con el potencial para convertirse en herramientas de gran utilidad para la solución de problemas de optimización en ingeniería, especialmente si se considera la flexibilidad que brinda el implementar la LS con todo tipo de algoritmos, tanto

estocásticos como determinísticos. Como ejemplos de esta situación están los trabajos de Dominguez-Isidro et al. [2], el de Özcan y Basaran [13] y el de Cai et al. [14], con desarrollos muy completos sobre MAs para optimización tanto numérica como combinatoria con restricciones; pero en todos los casos la prueba de las soluciones propuestas se ha hecho a través de *benchmarks* clásicos.

Por otra parte, aunque los MAs han tenido un amplio desarrollo, muchos de sus detractores señalan que no se ha realizado un trabajo sistemático para entender su comportamiento desde el punto de vista de la teoría [6]. La mayor parte de los avances en estos algoritmos tiene un alto contenido empírico, ya que están basados en metaheurísticas exitosas que simulan procesos de población abstrayendo la realidad con un cierto grado de subjetividad, y su análisis formal tampoco ha sido realizado de manera profunda [4], [28]. Más allá de los estudios de Moscato, Cotta y Neri [1], [7], [8], [9], [24] sobre la teoría inicial de los MAs, son pocas las aportaciones adicionales al respecto; en este sentido se destacan los trabajos de Krasnogor y Smith [12], que presentaron un tutorial para el desarrollo de MAs considerando aspectos como su taxonomía y modelado; del mismo Krasnogor [6], que creó un lenguaje de patrones para el diseño y caracterización de MAs, y el de Ong et al. [26], que propusieron una clasificación de los MAs adaptivos.

Otro punto importante no explotado en todo su potencial se refiere a que los algoritmos meméticos pueden ser paralelizados fácilmente, lo cual permite incrementar tanto la complejidad como la escala de los problemas que se van a resolver, a la vez que se reduce el tiempo requerido para su solución. Esta veta de desarrollo adquiere mayor trascendencia conforme evolucionan y se mejoran las plataformas de cómputo, especialmente en la parte correspondiente al *hardware*. Sobre esta línea se desarrollan los trabajos de Zerrouki y Belkadi [27] y los de García et al. [29], que desarrollaron aplicaciones de MAs paralelizados para problemas combinatorios de planificación.

Por su parte, Bozejko y Wodecki [30] propusieron una metodología para la paralelización de algoritmos meméticos basada en la división de la población en subconjuntos de soluciones, incluyendo una implementación modelo para una supercomputadora real y ejecutada con diferentes agrupaciones de procesadores.

Desde el punto de vista de las aplicaciones, la tendencia es a desarrollar MAs adaptivos, utilizando diferentes algoritmos de población y considerando el autoajuste en la búsqueda local. En esta categoría, Li et al. [15], Tang et al. [20], y Rakshit et al. [21] han presentado diferentes métodos autoadaptivos, aunque de nuevo queda pendiente el tema de la formalización.

4. CONCLUSIONES

Si bien las metaheurísticas tienen una larga y exitosa historia como herramientas para la solución de problemas de optimización dura, el concepto de hibridación generó una nueva filosofía al respecto, la computación memética. La combinación sinérgica de algoritmos para búsqueda global basados en población, y de métodos específicos de búsqueda local, ha abierto una gama muy amplia de posibilidades, de tal forma que las aplicaciones con MAs pueden cubrir prácticamente todas las ramas del diseño en ingeniería. Sin embargo, su uso en el mundo real ha sido muy limitado y se ha enfocado principalmente a la solución de problemas de optimización combinatoria; solo recientemente se ha extendido a la optimización continua con restricciones.

Por otra parte, el carácter híbrido de los algoritmos meméticos les da una mayor complejidad con relación a otras técnicas de optimización, lo cual dificulta su análisis teórico. Además, aunque el número de desarrollos en este campo crece día tras día, la mayor parte del avance se basa en conocimientos empíricos provenientes de la experiencia en el uso de otras metaheurísticas cuya teoría subyacente ha sido pobremente explorada, lo cual ha llevado a una marcada falta de fundamento teórico.

En relación con el futuro de los MAs, sus principales tendencias de desarrollo están dentro de la categoría de técnicas autoadaptativas, relacionadas tanto con la generación del conocimiento (memes) como con el uso del mismo para forzar la evolución de los agentes o soluciones de un problema específico, lo que dará origen a soluciones cada vez más sólidas y con mayor potencial.

Agradecimientos

Todos los autores agradecen el apoyo del Instituto Politécnico Nacional de México, a través de su Secretaría de Investigación y Posgrado vía el proyecto SIP-20141257. El quinto autor agradece al Conacyt, de México, por la beca para estudios de posgrado en el Cidetec-IPN.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Neri, y C. Cotta, "Memetic algorithms and memetic computing optimization: a literature review", *Swarm and Evolutionary Computation*, 2, pp. 1-14, 2012.
- [2] S. Domínguez-Isidro, E. Mezura-Montes, y G. Leguizamón, "Memetic differential evolution for constrained numerical optimization problems", en *Proceedings of 2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 2996-3003, 2013.
- [3] E. Vega-Alvarado, E. Santiago-Valentín, A. Sánchez-Márquez, A. Solano-Palma, E. A. Portilla-Flores y L. Flores-Pulido, "Síntesis óptima de un mecanismo plano para seguimiento de trayectoria utilizando evolución diferencial", en *Research in Computer Science*, vol. 72, O. Pichardo (Ed.): CIC-IPN, 2014, pp. 85-98.
- [4] I. Boussaïd, J. Lepagnot y P. Siarry, "A survey on optimization metaheuristics", *Information Sciences*, 237, pp. 82-117, 2013.
- [5] X. Yang, "Harmony search as a metaheuristic algorithm", en *Music-Inspired Harmony Search Algorithm: Theory and Applications, Studies in Computational Intelligence*, Z.W. Geem (Ed.), Springer Berlin, vol. 191, pp. 1-14, 2009.
- [6] N. Krasnogor, "Memetic algorithms", en *Handbook of Natural Computing*, G. Rosenberg, T. Bäck & J. Kok (Eds.), Springer Berlin, vol. 2, pp. 905-936, 2012.
- [7] P. Moscato y C. Cotta, "Una introducción a los algoritmos meméticos", *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 19, pp. 131-148, 2003.
- [8] P. A. Moscato, "On evolution, search, optimization, genetic algorithms and martial arts: towards memetic algorithms", *Technical Report. Caltech Concurrent Computation Program Report 826*, Caltech, Pasadena, CA, 1989.
- [9] F. Neri, y C. Cotta, "A primer on memetic algorithms", in *Handbook of Memetic Algorithms-Studies in Computational Intelligence*, vol. 379, F. Neri, C. Cotta y P. Moscato (Eds.): Springer Verlag, 2012, pp. 43-54.
- [10] Y. Ong, M. H. Lim y X. Chen, "Memetic computation – past, present and future", *IEEE Computation Intelligence Magazine*, vol. 15 (5), pp. 24-31, May. 2010.
- [11] X. Chen, Y. Ong, y K. C. Tan, "A multi-facet survey on memetic computation", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 15 (5), pp. 591-607, Oct. 2011.
- [12] K. Krasnogor y J. Smith, "A tutorial for competent memetic algorithms: model, taxonomy, and design issues", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 9 (5), pp. 474-488, October 2005.
- [13] E. Özcan, y C. Basaran, "A case study of memetic algorithms for constraint optimization", *Soft Computing*, 13, pp. 871-882, 2009.
- [14] X. Cai, Z. Hu, y Z. Fan, "A novel memetic algorithm based on invasive weed optimization and differential evolution for constrained optimization", *Soft Computing*, 17, pp. 1893-1910, 2013.
- [15] Y. Li, B. Wu, L. Jiao, y R. Liu, "Memetic algorithm with double mutation for numerical optimization", *IScIDE 2011, LNCS 7202*, Y. Zhang (Ed.): Springer Verlag, 2012, pp. 66-73.
- [16] P. Garg, "A comparison between memetic algorithm and genetic algorithm for the cryptanalysis of simplified data encryption standard algorithm", *International Journal of*

- Network Security & its Applications (IJNSA)*, 1 (1), pp. 34-42, April 2009.
- [17] J. Zhang, L. Zhang, y J. Xie, "Application of memetic algorithm in control of linear inverted pendulum", *Proceedings of IEEE CCIS2011*, pp. 103-107, 2011.
- [18] P. Merz, y B. Freisleben, "Memetic algorithms for the traveling salesman problem", *Complex Systems*, 13, pp. 297-345, 2001.
- [19] J. Ni, L. Li, F. Qiao, y Q. Wu, "A novel memetic algorithm and its application to data clustering", *Memetic Computation*, 5, pp. 65-78, 2013.
- [20] J. Tang, M. H. Lim, y Y. S. Ong, "Diversity-adaptive parallel memetic algorithm for solving large scale combinatorial optimization problems", *Soft Computing*, vol. 11 (9), pp. 873-888, July 2007.
- [21] P. Rakshit, A. Konar, S. Das, y A. K. Nagar, "ABC-TDQL: an adaptive memetic algorithm", *Proceedings of 2013 IEEE Workshop on Hybrid Intelligent Models and Applications*, pp. 35-42, April 2013.
- [22] X. Z. Gao, X. Wang, y K. Zenger, "A bee foraging-based memetic harmony search method", *Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 184-189, October 2012.
- [23] I. Fister-Jr., X. Yang, I. Fister, y J. Brest, "Memetic firefly algorithm for combinatorial optimization", *Research Gate* (online), April 2012. Disponible en: <http://researchgate.net>.
- [24] P. Moscato, y C. Cotta, "A gentle introduction to memetic algorithms", *Handbook of Metaheuristics*, F. Glover & G. Kochenbergh (Eds.), Kluwer Academic Publishers, Boston, pp. 105-144, 2003.
- [25] M. A. Montes de Oca, C. Cotta, y F. Neri, "Local search", *Handbook of Memetic Algorithms- Studies in Computational Intelligence*, vol. 379, F. Neri, C. Cotta y P. Moscato (Eds.): Springer Verlag, pp. 29-42, 2012.
- [26] Y. S. Ong, M. H. Lim, N. Zhu, y K. W. Wong, "Classification of adaptive memetic algorithms: a comparative study", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, vol. 36 (1), pp. 141-152, February 2006.
- [27] K. Zerrouki, y K. Belkadi, "Parallelization of memetic algorithms and electromagnetism metaheuristics for the problem of scheduling in the production systems of HFS type", *International Journal of Computer Science Issues*, vol. 10 (1), pp. 639-645, January 2013.
- [28] A. E. Eiben, y J. E. Smith, *Introduction to Evolutionary Computing 2nd ed.*, Natural Computing Sciences, Springer Verlag, pp. 33-34, 2007.
- [29] V. J. García, P. M. Franca, A. Mendes, y P. Moscato, "A parallel memetic algorithm applied to the total tardiness machine scheduling problem", *Proceedings of 20th International Parallel and Distributed Processing Symposium 2006*, pp. 25-29, April 2006.
- [30] W. Bozejko, y M. Wodecki, "The methodology of parallel memetic algorithms design", *Proceedings of the 3rd International Conference on Agents and Artificial Intelligence ICAART 2011*, pp. 2996-3003, Rome, January 2011.

DETECCIÓN DE CAVITACIÓN EN UNA BOMBA CENTRÍFUGA UTILIZANDO ANALISIS DE ENVOLVENTE

Cavitation detection in a centrifugal pump using envelope analysis

RESUMEN

La detección temprana de fallas en los componentes que integran una bomba centrífuga ha sido una constante tarea de investigación en los últimos años, debido a la importancia de mantener una producción industrial constante. En este trabajo se estudia la detección de cavitación mediante el análisis de vibraciones mecánicas utilizando un banco de pruebas para la simulación. Para la extracción de las señales fueron empleados sensores de tipo acelerómetro y acústico, ubicados en el cuerpo de la bomba mientras operaba tanto en estado normal como en estado de falla inducida. El método de la envolvente fue utilizado para procesar las señales de vibración en el dominio del tiempo y estas señales fueron comparadas mediante el procesamiento con la Transformada Rápida de Fourier. Como resultado, el análisis de envolvente mostró ser una adecuada herramienta en la detección de cavitación en bombas centrífugas.

Palabras clave: bomba centrífuga, cavitación, análisis de envolvente, vibraciones.

ABSTRACT

Early detection of faulty components of a centrifugal pump is a constant task of research in recent years, due to the importance of maintaining a continuous industrial production. In this paper, detection of cavitation is studied by analyzing mechanical vibrations using a testbed for simulation. To extract signals, an accelerometer and acoustic sensors were used, located in the body of the pump while operating both in normal and failure induced conditions. The envelope analysis was utilized to process the vibration signals in time domain, and comparisons were made using the Fast Fourier Transform. As a result, envelope analysis showed to be an appropriate tool for detecting cavitation in centrifugal pumps.

Keywords: cavitation, centrifugal pump, envelope analysis, vibrations.

1. INTRODUCCIÓN

En busca de mayor productividad, las industrias se han encaminado a la búsqueda de fortaleza en el mantenimiento de su maquinaria y prestan mucha atención a la detección y diagnóstico de fallas como principal tarea de un sistema de monitoreo; así han logrado mejorar la seguridad de la planta y reducir las averías [1], [2].

La detección de fallas se ha estudiado mucho en máquinas rotativas, con el fin de optimizar la confiabilidad y disponibilidad del equipo en el entorno de trabajo. Entre las máquinas rotativas encontramos las bombas centrífugas, que son turbomáquinas que consumen una importante fracción de energía (el 25% del consumo en fábricas manufactureras y el 59% en plantas petroleras, como indica el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE), en su estudio *United States Industrial Electric Motor Systems Market Opportunities*

Assessment [3]. Por lo tanto, mantener la operación constante de estos equipos es de vital importancia y, por supuesto, detectar fallas oportunamente supone un mantenimiento eficiente del equipo.

Por lo general, la detección de fallas en bombas centrífugas se ha realizado adquiriendo señales acústicas o de vibración [4], [5], provenientes de sensores instalados en diferentes puntos del cuerpo de la máquina. Estas señales pueden ser procesadas con ayuda de algoritmos matemáticos, con el fin de determinar frecuencias y magnitudes propias de una falla de funcionamiento; sin embargo, existe una exigencia en cuanto a la confiabilidad de las técnicas empleadas en el campo del procesamiento.

Uno de los defectos estudiados en los últimos años en bombas centrífugas es el producido por el fenómeno de la cavitación, debido a que afecta el rendimiento hidráulico del equipo [6]. La información de las señales obtenidas

JUAN ESTEBAN ÁLVAREZ N.

Ingeniero mecánico.
Joven investigador Colciencias
Estudiante de Maestría en Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Pereira
jealvarez@utp.edu.co

HÉCTOR FABIO QUINTERO R.

Ingeniero mecánico Ph. D.
Docente Titular
Universidad Tecnológica de Pereira
hquinte@utp.edu.co

JUAN FERNANDO LÓPEZ L.

Ingeniero mecánico, M. Sc.
Doctorando en Ingeniería
Universidad Tecnológica de Pereira
juanferll@gmail.com

en este tipo de falla comúnmente ha sido procesada por medio de la transformada rápida de Fourier (FFT). En [9] se emplea un sensor acústico para adquirir información del estado de falla de cavitación de una bomba centrífuga, procesando esta mediante la FFT; sin embargo, este tipo de análisis es débil en el dominio de tiempo. En [7] y [8] emplean la transformada Wavelet Continua (CWT) para diagnosticar fallas en una bomba centrífuga, utilizando un sensor piezoeléctrico de tipo acelerómetro; no obstante, esta transformada requiere un considerable esfuerzo computacional [10]. En [11] se emplea la transformada Wavelet Discreta (DWT) para procesar la señal de vibración, pero debido a la carencia de propiedad invariante en el tiempo, se desperdicia información útil [7].

La técnica de la envolvente en el análisis de vibraciones ha sido estudiada para detectar defectos en rodamientos, buscando zonas resonantes excitadas por fuerzas de impacto periódicas, cuya frecuencia de repetición es un indicador del lugar donde se encuentra el defecto y de su amplitud [12].

En el presente estudio se emplea la transformada Hilbert para procesar y obtener la envolvente de las señales de vibración de una bomba centrífuga bajo cavitación inducida; además, se usan dos sensores de tipo acelerómetro y acústico para determinar cuál es el más apropiado para la aplicación. El presente documento comienza con el capítulo del módulo experimental, en el que se mencionan los elementos utilizados en la investigación y la manera de desarrollar el experimento. En seguida viene un capítulo sobre el procesamiento de las señales para indicar el tratamiento empleado; posteriormente se muestra el análisis de los resultados experimentales.

2. MÓDULO EXPERIMENTAL

El banco experimental utilizado se muestra en la figura 1 y está integrado por una bomba centrífuga de 3 álabes, que gira a 3450 rpm, acoplada directamente a un motor eléctrico de 1 HP.



Figura 1. Banco de pruebas experimental.

La señal de vibración es capturada mediante un sistema de adquisición de datos a una frecuencia de muestreo de 51 200 Hz. El acelerómetro marca Shinkawa tiene una sensibilidad de 100 mV/G; el sensor acústico de marca Physical Acoustics Corporation, cuenta con una sensibilidad de 45 V/(m/s).

2.1 Caracterización de la bomba centrífuga

El régimen de operación óptimo de la bomba centrífuga se muestra en la figura 2, así como las curvas características de la bomba centrífuga que corresponden a la altura que da la bomba y a la eficiencia para determinado caudal.

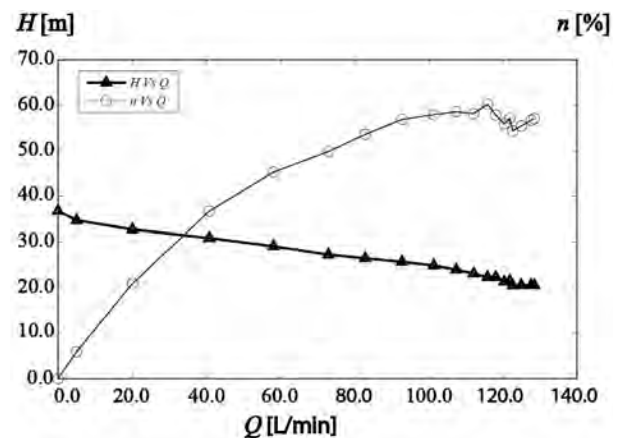


Figura 2. Curvas características de la bomba centrífuga.

La curva de cabeza fue encontrada con (1), la cual corresponde a la ecuación de Bernoulli generalizada para flujos de fluidos. Las medidas necesarias para encontrar este parámetro fueron registradas con manómetros y un medidor de flujo instalado en el circuito hidráulico. La curva de eficiencia, presente de igual manera en la figura 1, se encontró con (2), para lo cual fue necesario establecer la corriente que consumía el motor de la bomba a diferentes flujos de operación. Entonces,

$$H = \frac{P_d - P_s}{\gamma} + Z_d - Z_s + \frac{V_d^2 - V_s^2}{2g} \quad (1)$$

donde los subíndices *s* y *d* representan la succión y la descarga respectivamente. Además,

$$\eta = \frac{WKW}{BKW} \quad (2)$$

donde *WKW* representa la potencia que recibe el fluido y *BKW* la potencia de la bomba.

2.2 Pruebas experimentales

Conociendo el régimen de trabajo óptimo de operación de la bomba centrífuga, que corresponde a un flujo entre 110-120 L/min, se define el estado de buena condición de operación tomando, con el sensor acústico y el acelerómetro, las señales de vibración en una posición axial al rodete. La figura 3 ilustra la posición del sensor en el cuerpo del equipo.

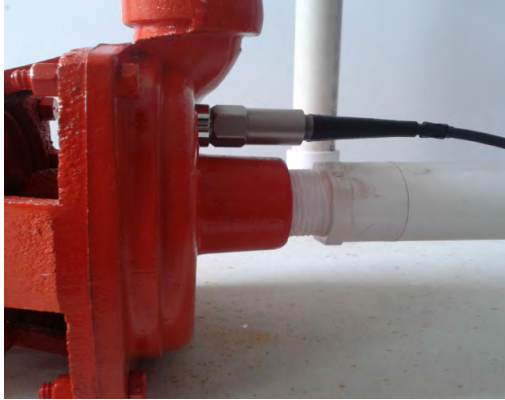


Figura 3. Posición axial al rodete de la bomba centrífuga.

Posteriormente, se varía el ángulo de apertura de la válvula de succión, con el fin de interrumpir el flujo del fluido, lo cual produce burbujas de vapor de agua que son llevadas hacia el rodete de la bomba, donde estallan y generan cavitación. De igual manera, se emplean el sensor acústico y el acelerómetro para captar las señales de vibración. La figura 4 representa la forma de onda de la señal de vibración captada con el acelerómetro, durante una condición buena de funcionamiento de la bomba.

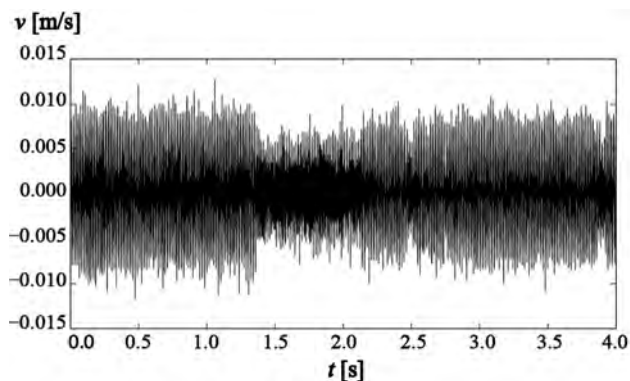


Figura 3. Forma de onda obtenida con el acelerómetro.

La forma de onda de la señal de vibración es obtenida paralelamente con el sensor acústico; la figura 4 representa la señal en el dominio del tiempo para la condición de buen funcionamiento de la bomba.

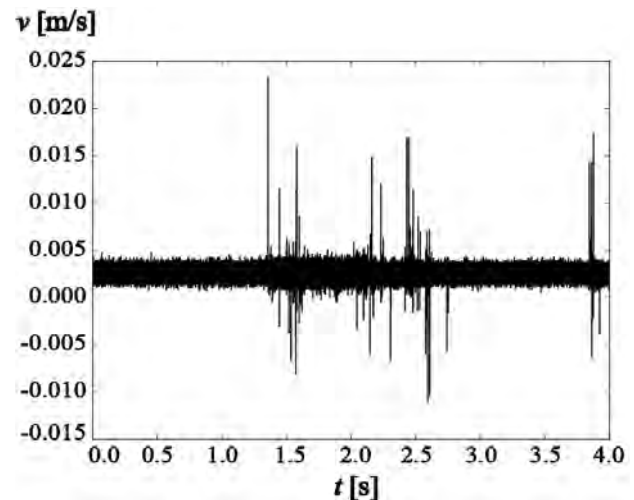


Figura 4. Forma de onda obtenida con el sensor acústico.

3. PROCESAMIENTO DE SEÑALES

Inicialmente, las señales son capturadas por los sensores en el dominio del tiempo; sin embargo, como se evidencia en las figuras 3 y 4, en las que se representa la forma de onda de la señal de vibración en buena condición de funcionamiento de la bomba, no dan un indicio o información relevante del patrón característico. Por tal motivo se recurre a transformar la señal temporal en señal en el dominio de la frecuencia (espectro) y se emplea la técnica de la envolvente.

3.1 Análisis de envolvente

Los equipos industriales del tipo bombas y sopladores generan gran cantidad de vibración aleatoria y causan un incremento en el ruido de fondo del espectro de frecuencia; por esta razón resultan útiles los procedimientos como el análisis de demodulación o análisis de envolvente [13].

El proceso de análisis comienza con la toma de la señal de la vibración en el dominio del tiempo; después se realiza el filtrado de la señal para eliminar la información innecesaria; posteriormente se usa el detector de envolvente con la Transformada Hilbert hasta obtener el espectro de envolvente. En el presente estudio, cada resultado del análisis de envolvente de las señales es comparado con el procesamiento de la señal empleando únicamente la Transformada Rápida de Fourier (FFT).

La figura 5 muestra en primer lugar las componentes espectrales características de una bomba centrífuga que opera en estado normal de funcionamiento a baja frecuencia, donde 1X corresponde a la frecuencia de giro de 57,5 Hz, mientras que la componente 3X equivale a 172,5 Hz, que es la frecuencia debida al número de álabes.

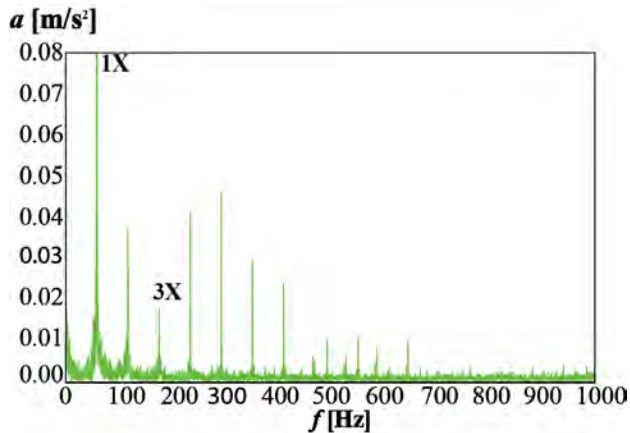


Figura 5. Componentes espectrales a baja frecuencia de una bomba centrífuga en estado normal de funcionamiento.

Las figuras 6 y 7 muestran los espectros, en condición de buen funcionamiento, de la bomba centrífuga, registrados empleando el acelerómetro y el sensor acústico, respectivamente. El espectro de color verde representa el análisis de envolvente y el espectro de color rojo el espectro con la FFT.

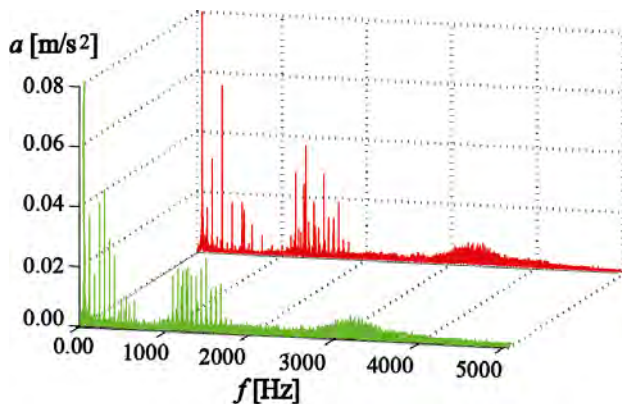


Figura 6. Espectro de frecuencia de la bomba centrífuga en condición de buen funcionamiento, registrado con el acelerómetro

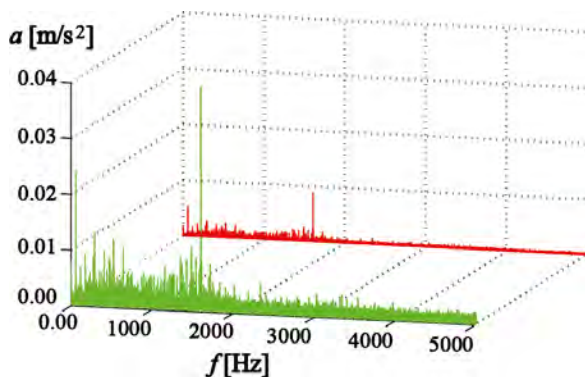


Figura 7. Espectro de frecuencia de la bomba centrífuga en condición de buen funcionamiento, registrado con el sensor acústico.

Los espectros de la bomba centrífuga en condición de cavitación, registrados empleando el acelerómetro y el sensor acústico, se muestran en las figuras 8 y 9 respectivamente.

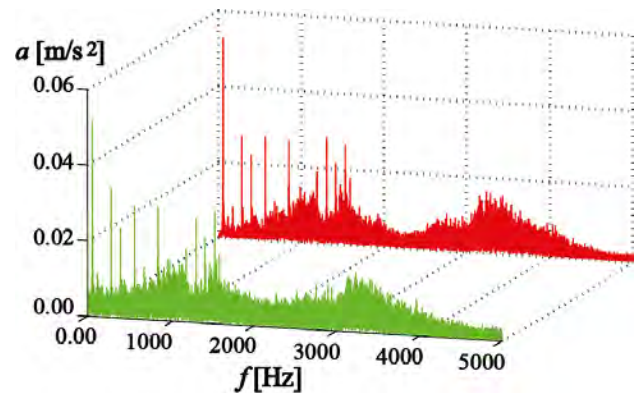


Figura 8. Espectro de frecuencia de la bomba centrífuga operando en cavitación, registrado con el acelerómetro.

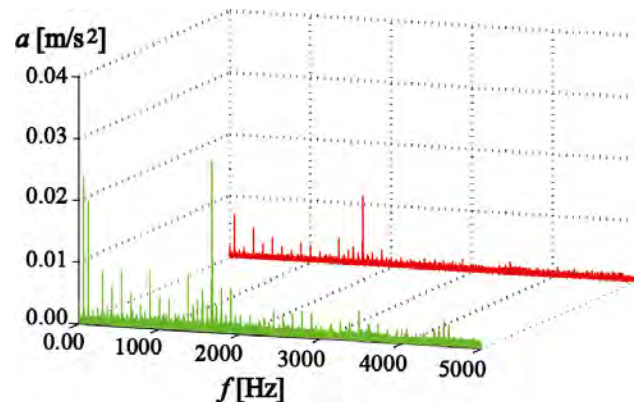


Figura 9. Espectro de frecuencia de la bomba centrífuga en cavitación, registrado con el sensor acústico.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el espectro de la figura 6 se puede observar la vibración en un estado de buena condición de funcionamiento, es decir, con la máxima eficiencia de operación. La imagen presenta, a baja frecuencia, componentes que corresponden a la velocidad de giro 1X del eje ; esta frecuencia corresponde a 57,5 Hz mientras que la frecuencia de paso de álabes se presenta a 172,5 Hz, que corresponde al componente 3X. Sin embargo, el énfasis en este estudio está puesto en las altas frecuencias.

Las figuras 6 y 7 muestran los resultados obtenidos a partir del procesamiento de la señal cuando se emplean el acelerómetro y el sensor acústico como instrumentos de adquisición; sin embargo, hay que resaltar que se pueden evidenciar mejor en el espectro del acelerómetro las magnitudes de las componentes frecuenciales.

Al avanzar a la segunda condición de funcionamiento, correspondiente al estado de cavitación, se observa en el espectro de la figura 8 un aumento de la vibración aleatoria a alta frecuencia, lo cual corresponde al fenómeno inducido, mientras que en la figura 9 no se ve esta condición; por lo tanto se infiere que el acelerómetro es más apropiado para detectar cavitación en bombas centrífugas.

El espectro del sensor acústico, mostrado en la figura 9, no muestra con claridad el comportamiento aleatorio de la señal de vibración a alta frecuencia, lo cual puede indicar posibles errores en el momento de identificar la falla.

En cuanto se refiere a la comparación de las señales procesadas mediante análisis de envolvente (señal de color verde) y mediante la FFT (señal de color rojo), se evidencia que se observa mejor la magnitud de las componentes frecuenciales en la figura 7, y que, en cambio, la FFT (que promedia la vibración) no tiene en cuenta información que podría resultar pertinente en el momento de alguna intervención.

5. CONCLUSIONES

En la presente investigación se hace la detección de falla de cavitación en una bomba centrífuga mediante el análisis de vibraciones, empleando el análisis de envolvente para el procesamiento de las señales. En este estudio se utilizaron un acelerómetro y un sensor acústico para adquirir las señales, pero se obtuvieron mejores resultados con el acelerómetro para la detección de la falla estudiada. El análisis de envolvente mostró ser más pertinente que el método de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para conocer información acerca de la magnitud de las componentes frecuenciales. Debido a que el campo de procesamiento es amplio, es necesario implementar más técnicas que permitan una mayor aproximación a las magnitudes de las frecuencias, para poder tomar correctas y oportunas decisiones en el mantenimiento industrial.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Colciencias por el apoyo al Programa de Jóvenes Investigadores 2013 y, de igual manera, al Grupo de Investigación de Proceso de Manufactura y Diseño de Máquinas de la Universidad Tecnológica de Pereira.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Z. Wang, Zh. Wang, "Chaotic parallel support vector machine and its application for fault diagnosis of hydraulic pump", *Prognostics and Health Management (PHM), 2013 IEEE Conference*. IEEE, 2013, pp. 1-6.
- [2] N. R. Sakthivel, V. Sugumaran, y B. Binoy "Automatic rule learning using roughset for fuzzy classifier in fault categorization of mono-block centrifugal pump". *Applied Soft Computing*, 2012, vol. 12, no. 1, pp. 196-203.
- [3] T. of E. N. E., and Stat S. OFA. "United States Industrial Electric Motor Systems Market Opportunities Assessment". Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Industrial Technologies, Washington, DC, 2002, p. 386.
- [4] S. Farokhzad, y H. Ahmadi, "Acoustic based cavitation detection of centrifugal pump by neural network". *Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2013, vol. 1, pp. 1-5.
- [5] A. Albraik, F. Althobiani, F. Gu, y A. Ball. "Diagnosis of centrifugal pump faults using vibration methods". *Journal of Physics: Conference Series* 2012, vol. 364, conference 1.
- [6] M. M. Stoppa, B. J. Cardoso Filho, y C. B. Martinez, "Incipient detection of cavitation phenomenon in centrifugal pumps", *Industry Applications, 2014 IEEE Transactions*, vol. 50, no. 1, p. 120.
- [7] V. Muralidharan, y V. Sugumaran, "Feature extraction using wavelets and classification through decision tree algorithm for fault diagnosis of mono-block centrifugal pump". *Measurement*, 2013, vol. 46, no. 1, pp. 353-359.
- [8] V. Muralidharan, y V. Sugumaran, "Rough set based rule learning and fuzzy classification of wavelet features for fault diagnosis of monoblock centrifugal pump". *Measurement*, 2013, vol. 46, no. 9, pp. 3057-3063.
- [9] S. Farokhzad, y H. Ahmadi, "Acoustic based cavitation detection of centrifugal pump by neural network". *Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2013, vol. 1, pp. 1-5.
- [10] E. P. Serrano, "Introducción a la transformada wavelet y sus aplicaciones al procesamiento de señales de emisión acústica". *Escuela de Ciencia y Tecnología – Universidad Nacional General de San Martín*, 2000.
- [11] V. Muralidharan, y V. Sugumaran, "A comparative study of Naïve Bayes classifier and Bayes net classifier

for fault diagnosis of monoblock centrifugal pump using wavelet analysis”. *Applied Soft Computing*, 2012, vol. 12, no. 8, pp. 2023-2029.

[12] J. E. Quiroga, G. Trujillo, S. Quintero, “Estudio de fallas incipientes en rodamientos usando la técnica de la envolvente y cepstrum”. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 2012, vol. 20, no. 3, pp. 350-359.

[13] *Sinais Vibra*. “Tutorial 3: Demodulación. Sistema de monitorización en continuo para mantenimiento predictivo. Ingeniería de mantenimiento”. Disponible en: <<http://www.sinais.es/Productos/Vibra/index.html>>

APLICACIÓN DEL CONTROL ROBUSTO AL CONTROL DE VUELO PARA EL SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIAS EN PROYECTILES TIERRA-TIERRA

Robust control application to flight control for trajectory tracking in surface-to-surface projectiles

RESUMEN

Este artículo presenta el diseño de un controlador robusto para el control de vuelo de un proyectil con aletas. Para simplificar el diseño, inicialmente se derivan ecuaciones del movimiento longitudinal del proyectil, y las variaciones de los coeficientes aerodinámicos de este movimiento son consideradas como la incertidumbre en los parámetros del modelo. El controlador diseñado se utiliza para estabilizar la dirección y la inclinación del proyectil, asegurando la dinámica en lazo cerrado deseada en presencia de incertidumbres, perturbaciones y ruidos. Con la implementación del controlador se analizan estabilidad robusta y rendimiento robusto. Los resultados obtenidos con este controlador se muestran con la simulación del sistema.

Palabras clave: alabeo, cabeceo, control de vuelo, control robusto, guiñada, proyectiles.

ABSTRACT

This paper presents the design of a robust controller to control the flight of a projectile provided with fins. To simplify the design, the equations of the longitudinal movement of the projectile are derived initially; the variations of the aerodynamic coefficients of this motion are considered as uncertainties in the model parameters. The designed controller is used to stabilize the pitch and yaw of the projectile, ensuring the desired closed loop dynamics in the presence of uncertainties, disturbances and noise. When controller is implemented, robust stability and robust performance are analyzed. The results obtained with this controller are shown by a system simulation.

Keywords: flight control, pitch, projectiles, robust control, roll, yaw.

1. INTRODUCCIÓN

La construcción de proyectiles sigue siendo en la actualidad un área en la que incursionan unas cuantas naciones, generalmente las que se consideran de primer mundo o desarrolladas. La fabricación de aparatos de este tipo ha tenido muy poco desarrollo en Colombia aunque su estudio no solo es del área armamentista, ya que es un tema interesante para la ingeniería; en efecto, en él se abordan variedad de temas de diferentes disciplinas, como la aerodinámica, la mecánica de fluidos, los sistemas de control y la resistencia de materiales. Por ello, la manera adecuada para abordar este sistema es usar una forma de ingeniería convergente.

En Colombia, el desarrollo tecnológico de proyectiles se ha enfocado principalmente al diseño y fabricación de motores de reacción con propelente sólido [1] y son pocos los trabajos orientados al control de vuelo de proyectiles, que involucra técnicas convencionales y modernas.

Los sistemas de control son parte fundamental de un aparato de este tipo, debido a que la mayoría de proyectiles no son tripulados ni pilotados, pues se intenta que sean dispositivos autónomos que cumplan su tarea de la forma más simplificada y automatizada posible.

En el diseño del sistema de control para un proyectil, no es suficiente establecer una trayectoria, ya que las condiciones de vuelo del proyectil no son constantes. Así, cualquier perturbación, aunque sea de pequeñas proporciones, hace que sea imprescindible la implementación de un sistema de control robusto.

Molins desarrolló un modelado general de lanzadera espacial [2], que tiene en cuenta las variaciones de masa, gravedad, densidad del aire, etc. En este modelado se determina un área de trabajo y se extrae un modelo lineal al que se asocia la incertidumbre en los parámetros. Sobre dicho modelo se aplica la técnica de control robusto QFT para diseñar los controladores que gobiernan los ángulos de inclinación y la coordenada de altura del centro de gravedad de la lanzadera espacial. La validación del sistema se hace mediante simulación.

LUINI LEONARDO HURTADO CORTÉS

Ingeniero mecánico, Ph.D.
Profesor adjunto
Universidad Autónoma de Colombia
llhurtadoc@gmail.com.

LUIS VILLARREAL LÓPEZ

Ingeniero industrial, M.Sc.
Profesor adjunto
Universidad Autónoma de Colombia
luis595@yahoo.com.

En el presente trabajo se diseñan dos controladores para un proyectil considerando el efecto de las perturbaciones, lo cual garantiza un desempeño nominal y una estabilidad y desempeño robustos durante el vuelo.

2. METODOLOGÍA

2.1 Dinámica del proyectil

El proyectil de aletas tiene una configuración aerodinámica tipo *canard* (estabilizadores colocados delante de las alas fijas) y está equipado con un motor de combustible sólido. Tiene cuatro accionamientos para el control de altitud (movimientos laterales y longitudinales) que manipulan la superficie de control (aletas) y pueden rotar en pares alrededor de sus ejes. La estabilización del ángulo de inclinación se realiza por superficies auxiliares (alerones). El objetivo del control es asegurar un seguimiento preciso en las maniobras de aceleración necesarias ante la presencia de incertidumbre en los parámetros aerodinámicos, de perturbaciones (por ejemplo ráfagas de viento) y de ruido en los sensores. El controlador genera las entradas para los servoaccionamientos que hacen rotar las aletas. La aceleración normal en cada plano y la razón de inclinación son medidas por un acelerómetro y un giróscopo respectivamente, que entregan las señales de retroalimentación para el controlador.

Para describir el movimiento del proyectil en el espacio, es indispensable plantear tres marcos de referencia ortogonales: un marco de referencia vertical (seguido por el proyectil), un marco de referencia fijo al cuerpo y un marco de referencia de la trayectoria de vuelo. Esos tres marcos de referencia tienen su origen en el centro de masa del proyectil. Los puntos característicos a lo largo del eje longitudinal del cuerpo del proyectil se muestran en la figura 1.

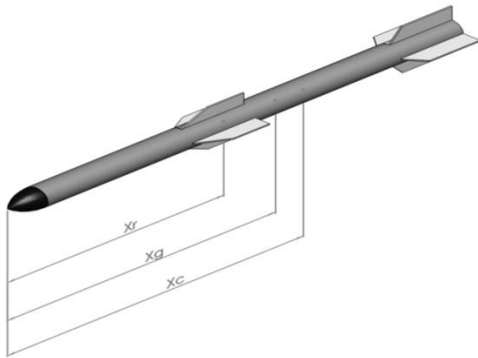


Figura 1. Coordenadas de puntos característicos en el cuerpo del proyectil.

x_g : coordenada del centro de masa del proyectil.

x_c : coordenada del centro de presión aerodinámica (punto donde son aplicadas las fuerzas aerodinámicas).

x_r : coordenada del eje de rotación de las aletas.

La estabilidad del proyectil depende de la localización del centro de presión con relación al centro de masa. Si $x_g < x_c$ entonces el proyectil es estáticamente estable. Para esa condición, las ecuaciones diferenciales no lineales y algebraicas que describen los seis grados de libertad del movimiento del proyectil son las siguientes:

1. Ecuaciones que describen el movimiento del centro de masa.

$$\begin{aligned} m\dot{V} &= P\cos\alpha\cos\beta - Q - G\sin\theta + F_x(t) \\ mV\dot{\theta} &= P(\sin\alpha\cos\gamma_c + \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma_c) + Y\cos\gamma_c - Z\sin\gamma_c - G\cos\theta + F_y(t) \\ -mV\cos\theta\dot{\psi} &= P(\sin\alpha\sin\gamma_c - \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma_c) + Y\sin\gamma_c + Z\cos\gamma_c + F_z(t) \end{aligned} \quad (1)$$

donde m es la masa del proyectil para un tiempo t ; P es el empuje del motor; Q es la fuerza de arrastre; Y y Z son las fuerzas de elevación en las direcciones y y z respectivamente; $G = mg$ es el peso del misil ($g = 9.80665 \text{ m/s}^2$ = aceleración de la gravedad al nivel del mar); y $F_x(t)$, $F_y(t)$ y $F_z(t)$ son las fuerzas de perturbación en las direcciones x , y , z respectivamente.

El empuje del motor está dado por $P = P_0 + (p_0 - p)S_a$, donde P_0 es el empuje del motor al nivel del mar; $p_0 = 101\,325 \text{ N/m}^2$ es la presión atmosférica al nivel del mar; p es la presión a la altitud de vuelo; y S_a es el área de la boquilla del motor en la sección de salida. Se asume que la tasa de consumo de la masa del propelente μ se mantiene constante, es decir $P_0 = \text{constante}$. Se toman como referencias a S y L , que son el área y la longitud del proyectil respectivamente; y $q = \frac{\rho V^2}{2}$, que es la presión dinámica, donde ρ es la densidad del aire a la correspondiente altitud. La fuerza de arrastre está dada por $Q = Q_a + Q_c$, en donde $Q_a = c_x q S$ es la fuerza de arrastre del cuerpo y las alas; $Q_c = (c_x^{\delta_y} |\delta_y| + c_x^{\delta_z} |\delta_z|) q S$ es la fuerza de arrastre debido a la deflexión de las aletas; δ_y, δ_z son los ángulos de deflexión de las aletas del movimiento longitudinal y lateral, respectivamente; y $c_x, c_x^{\delta_y}, c_x^{\delta_z}$ son coeficientes adimensionales. La fuerza de elevación está dada por $Y = Y_a + Y_c$, donde $Y_a = c_y q S$ es la fuerza de elevación del cuerpo y las alas, y en donde, adicionalmente, $c_y = c_y^\alpha \alpha$ y $Y_c = c_y^{\delta_z} \delta_z q S$ es la fuerza de elevación debido a la deflexión de las aletas horizontales, y en donde, de nuevo, c_y^α es un coeficiente adimensional. Similares expresiones se mantienen para la fuerza de elevación $Z = Z_a + Z_c$, $Z_a = c_z q S$, donde $c_z = c_z^\beta \beta$ y $Z_c = c_z^{\delta_y} \delta_y q S$. Por la simetría del proyectil, $c_z^\beta = -c_y^\alpha$, $c_z^{\delta_y} = -c_y^{\delta_z}$. Los coeficientes aerodinámicos $c_x, c_x^{\delta_y}, c_x^{\delta_z}, c_y^\alpha, c_y^{\delta_z}, c_z^\beta$ dependen tanto de la geometría del proyectil como del número Mach $M (= V/a)$, en el que a es la velocidad del sonido a la altitud correspondiente.

Estos coeficientes son aproximados, pero para una mayor exactitud se usan datos experimentales.

2. Ecuaciones que describen el movimiento rotacional alrededor del centro de masa:

$$\begin{aligned} I_x \dot{\omega}_x + (I_z - I_y) \omega_y \omega_z &= M_x^f + M_x^d + M_x^c + M_x(t) \\ I_y \dot{\omega}_y + (I_x - I_z) \omega_z \omega_x &= M_y^f + M_y^d + M_y^c + M_y(t) \\ I_z \dot{\omega}_z + (I_y - I_x) \omega_x \omega_y &= M_z^f + M_z^d + M_z^c + M_z(t) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{\psi} &= \omega_y \cos \gamma - \omega_z \cos \gamma / \cos \theta \\ \dot{\theta} &= \omega_y \sin \gamma - \omega_z \cos \gamma \\ \dot{\gamma} &= \omega_x - \tan \theta (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma) \end{aligned} \quad (3)$$

donde, I_x, I_y, I_z son los momentos de inercia del proyectil; M_x^f, M_y^f, M_z^f son momentos aerodinámicos debidos al ángulo de ataque α y al ángulo de desplazamiento lateral β ; M_x^d, M_y^d, M_z^d son momentos de amortiguamiento aerodinámico debidos a las velocidades de alabeado, inclinación y orientación $\omega_x, \omega_y, \omega_z$, respectivamente; M_x^c, M_y^c, M_z^c son momentos de control debidos a las deflexiones de las aletas $\delta_x, \delta_y, \delta_z$, respectivamente; y $M_x(t), M_y(t), M_z(t)$ son momentos generalizados por las perturbaciones alrededor de los correspondientes ejes. Entonces, se tiene que:

- $M_x^f = (m_x^\alpha \alpha + m_x^\beta \beta) q S L$; $M_y^f = m_y^\beta \beta q S L$; $M_z^f = m_z^\alpha \alpha q S L$, donde $m_x^\alpha, m_x^\beta, m_y^\beta, m_z^\alpha$ son coeficientes adimensionales;
- $M_x^d = m_x^{\omega_x} \omega_x q S L^2 / V$; $M_y^d = m_y^{\omega_y} \omega_y q S L^2 / V$; $M_z^d = m_z^{\omega_z} \omega_z q S L^2 / V$, donde $m_x^{\omega_x}, m_y^{\omega_y}, m_z^{\omega_z}$ son coeficientes adimensionales;
- $M_x^c = m_x^{\delta_x} \delta_x q S L$; $M_y^c = m_y^{\delta_y} \delta_y q S L$; $M_z^c = m_z^{\delta_z} \delta_z q S L$ donde $m_x^{\delta_x}, m_y^{\delta_y}, m_z^{\delta_z}$ son coeficientes adimensionales. Para la configuración del proyectil en mención, $M_y^c = Z_c(x_G - x_R) \cos \beta$, $M_z^c = Y_c(x_G - x_R) \cos \alpha$ dado que $m_y^{\delta_y} = -c_z^{\delta_z}(x_G - x_R) / L \cos \beta$, $m_z^{\delta_z} = c_y^{\delta_y}(x_G - x_R) / L \cos \alpha$.

3. Ecuaciones que proporcionan la relación entre los ángulos $\psi, \theta, \gamma, \alpha, \beta, \Psi, \Theta, \gamma_c$:

$$\begin{aligned} \sin \beta &= (\sin \theta \sin \gamma \cos(\Psi - \psi) - \cos \gamma \sin(\Psi - \psi)) \cos \theta - \cos \theta \sin \gamma \sin \theta \\ \sin \alpha &= ((\sin \theta \sin \gamma \cos(\Psi - \psi) + \sin \gamma \sin(\Psi - \psi)) \cos \theta - \cos \theta \cos \gamma \sin \theta) / \cos \beta \\ \sin \gamma_c &= (\cos \alpha \sin \beta \sin \theta - (\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \beta \sin \gamma) \cos \theta) / \cos \Theta \end{aligned} \quad (4)$$

4. Ecuaciones que proporcionan las aceleraciones n_{x1}, n_{y1}, n_{z1} del marco de referencia de fijo al cuerpo:

$$n_{x1} = n_x \cos \alpha \cos \beta + n_y \sin \alpha - n_z \cos \alpha \sin \beta$$

$$\begin{aligned} n_{y1} &= -n_x \sin \alpha \cos \beta + n_y \cos \alpha + n_z \sin \alpha \sin \beta \\ n_{z1} &= n_x \sin \beta + n_z \cos \beta \end{aligned} \quad (5)$$

en las que las aceleraciones n_x, n_y, n_z en el marco de referencia de la trayectoria de vuelo están dadas por

$$\begin{aligned} n_x &= (P \cos \alpha \cos \beta - Q) / G \\ n_y &= (P \sin \alpha + Y) / G \\ n_z &= (-P \cos \alpha \sin \beta + Z) / G \end{aligned} \quad (6)$$

Las aceleraciones n_{y1}, n_{z1} son medidas por acelerómetros fijos a los ejes y_1, z_1 , respectivamente. Por brevedad, en lugar de n_{y1}, n_{z1} se escribirá n_y, n_z .

Para pequeñas desviaciones nominales del movimiento (sin perturbación), el movimiento en tres dimensiones del proyectil puede ser descompuesto con suficiente precisión en tres movimientos independientes: inclinación, orientación y alabeado. Para el diseño del controlador se considerará únicamente la perturbación en el movimiento de inclinación. En este caso el comportamiento del proyectil se caracteriza por los ángulos Θ y θ (o equivalentemente, α y θ). Debido a la simetría del proyectil, el sistema de estabilización de orientación es análogo al sistema de estabilización de inclinación. Las ecuaciones que describen el movimiento longitudinal del proyectil se derivan de la siguiente manera, a partir de la figura 2:

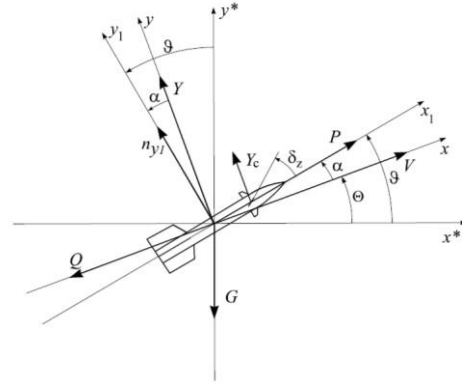


Figura 2. Diagrama de fuerzas en el plano vertical.

1. Ecuaciones que describen el movimiento del centro de masa;

Estas ecuaciones se obtienen a partir de (1) sustituyendo $\beta = 0, \gamma_c = 0$

$$m \dot{V} = P \cos \alpha - Q - G \sin \theta + F_x(t) \quad (6)$$

$$m V \dot{\theta} = P \sin \alpha + Y - G \cos \theta + F_y(t) \quad (7)$$

2. Ecuaciones que describen el movimiento rotacional alrededor del centro de masa:

Estas ecuaciones se obtienen a partir de (2) y (3), sustituyendo $\omega_x = 0, \omega_y = 0, \gamma = 0$.

$$\begin{aligned} I_z \dot{\omega}_z &= M_z^f + M_z^d + M_z^c + M_z(t), \\ \dot{\theta} &= \omega_z \end{aligned} \quad (8)$$

3. Ecuación que suministra la relación entre los ángulos α , θ , y Θ .

Esta ecuación se obtiene de (4) para $\Psi = 0$, y $\psi = 0$.

$$\alpha = \theta - \Theta \quad (9)$$

4. Ecuación que describe la aceleración normal n_y .

Esta ecuación se obtiene de (5) para $\beta = 0$.

$$n_y = -\frac{P \cos \alpha - Q}{G} \operatorname{sen} \alpha + \frac{P \operatorname{sen} \alpha + Y}{G} \cos \alpha \quad (10)$$

Después, se asume que la velocidad V del proyectil (o el número Mach) es constante y la ecuación diferencial no lineal (6) asociada con V es omitida en el diseño del modelo. Igualmente, se omitirán los efectos de la fuerza gravitacional en (7).

Para el diseño del controlador, las ecuaciones (7) a (10) son linealizadas en torno a los puntos de operación ($\Theta = \Theta^0$, $\theta = \theta^0$, $\alpha = \alpha^0$, $\omega_z = \omega_z^0$, $\delta = \delta_z^0$).

2.2 Incertidumbre en los parámetros del modelo

Se considera ahora la dinámica del sistema de estabilización con los coeficientes calculados para el movimiento sin perturbación, en el cual el proyectil vuela de forma horizontal en la atmósfera, es decir $\theta^* = 0^\circ$ con velocidad inicial $V^* = 300 \text{ m/s}$ a diferente altitud H^* . Los parámetros del movimiento sin perturbación son calculados por integración numérica a partir de las ecuaciones previas de este trabajo, tomando en cuenta el cambio de masa del proyectil durante el vuelo, la dependencia de la densidad del aire en la altitud del vuelo y la dependencia de los coeficientes aerodinámicos con el número Mach.

La principal variación de los coeficientes del movimiento sometido a perturbaciones sucede en los coeficientes aerodinámicos c_x , c_y^α , m_z^α , $m_z^{\omega_z}$; estos coeficientes se determinan usualmente de forma experimental como función del número Mach y pueden variar en la práctica en intervalos suficientemente amplios, porque se supone que los parámetros del proyectil no se conocen con exactitud y porque los coeficientes aerodinámicos conducen a variaciones de un 30%, en el caso del movimiento sometido a perturbaciones.

2.3 Requisitos de desempeño

El objetivo del sistema de estabilización del proyectil es alcanzar y mantener la aceleración normal deseada ante la presencia de perturbaciones y ruido en los sensores. El diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado, que incluye la retroalimentación y el controlador, así como los elementos que reflejan la incertidumbre en el modelo

y las funciones de ponderación relacionadas con los requisitos de desempeño se muestran en la figura 3 [3].

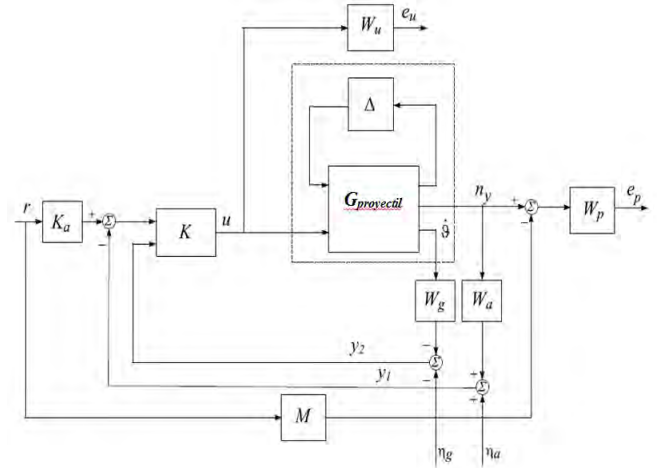


Figura 3 Diagrama de bloques en lazo cerrado del sistema.

Este diagrama tiene una señal de referencia r ; ruidos n_a y n_g sobre la medición de n_y y $\dot{\theta}$, respectivamente; y dos pesos en las salidas e_p y e_u , que caracterizan los requisitos de desempeño. Las funciones de transferencia W_a y W_g representan las mediciones dinámicas del acelerómetro para n_y , y del tacómetro para $\dot{\theta}$, respectivamente. El coeficiente K_a es la ganancia del acelerómetro. El sistema M es el modelo ideal que debe ser ajustado al diseño del sistema en lazo cerrado. El bloque rectangular, que se muestra con líneas punteadas, representa el modelo bajo perturbaciones del proyectil $G = F_U(G_{proyectil}, \Delta)$. Dentro del bloque rectangular se encuentra el modelo nominal del proyectil $G_{proyectil}$ y el bloque de incertidumbre en los parámetros del modelo Δ . La matriz Δ es desconocida pero tiene una estructura diagonal y está normalmente acotada $\|\Delta\|_\infty < 1$. Se requiere que, para el desempeño, la matriz de transferencia de r, n_a y n_g (entradas) a e_p y e_u (salidas) sea pequeña en el sentido de $\|\cdot\|_\infty$, para todas las posibles matrices de incertidumbres Δ .

Se requiere diseñar un controlador para realizar un seguimiento coordinado de maniobras de aceleración por encima de 15 G, con una constante de tiempo no mayor a 1 s y una precisión en el seguimiento de comandos que no supere, en el peor caso, el 5%. El controlador diseñado debería también generar señales de control que no violen las restricciones $|\delta_z| < 30^\circ$ ($\approx 0,52 \text{ rad}$), $|\alpha| < 20^\circ$ ($\approx 0,35 \text{ rad}$), donde δ_z y α son los ángulos de control de la deflexión de las aletas y ángulo de ataque, respectivamente.

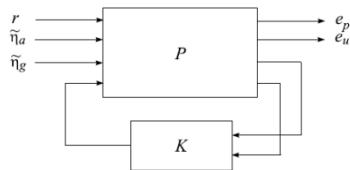
Para el diseño del sistema de control se tomarán como referencia los parámetros de un proyectil AGM-114Z Hellfire, destinado a operaciones aire-tierra y tierra-tierra, cuyos valores se muestran en la tabla 1 [4].

Parámetro	Descripción	Valor	Unidad
L	Longitud del proyectil	1,6	m
d	Diámetro del proyectil	0,12	m
S	Área de referencia	0,081	m ²
S _a	Área de la tobera del motor	0.011	m ²
m ₀	Masa inicial del proyectil	45	kg
μ	Consumo de combustible	0,3	kg/s
J _{x0}	Momento de inercia inicial del proyectil en el eje x	8,10 x 10 ⁻²	kg m ²
J _{y0}	Momento de inercia inicial del proyectil en el eje y	9,64	kg m ²
J _{z0}	Momento de inercia inicial del proyectil en el eje z	9,64	kg m ²
P ₀	Empuje del motor al nivel del mar	740g	N
x _{G0}	Coordenada del centro de masa inicial del proyectil	0,8	m
x _{C0}	Coordenada del centro de presión inicial del proyectil	1,0	m
x _R	Coordenada de ejes de rotación de aletas	0,3	m
w _{dx}	Frecuencia natural del servoaccionamiento	150	rad/s
x _{dx}	Amortiguamiento del servoaccionamiento	0,707	
t _r	Duración de las etapas activas del vuelo	40	s

Tabla 1. Parámetros de un misil AGM-114Z Hellfire

2.4 Diseño H_∞

El método de diseño H_∞ va ser utilizado para encontrar la salida de retroalimentación del controlador K para la conexión mostrada en la figura 4. Cabe resaltar que para esta configuración se excluyen las incertidumbres en las entradas y las salidas.

Figura 4. Sistema de lazo cerrado para el controlador H_∞ .

En la figura 5 se muestra la respuesta transitoria del sistema en lazo cerrado con el diseño del controlador H_∞ para una señal escalón con magnitud $r = \pm 15$ G, que corresponde a un cambio en la aceleración normal ± 15 G. La respuesta transitoria para este controlador es oscilatoria, el sobrepico es inferior al 30% y el tiempo de establecimiento es de aproximadamente 2 s.

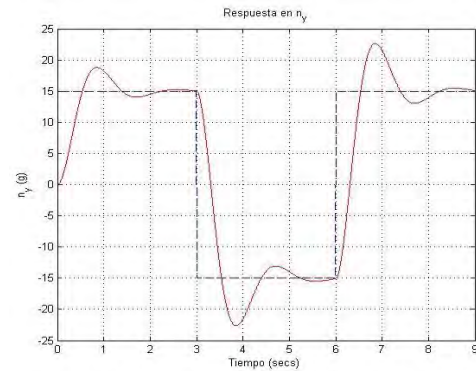


Figura 5. Respuesta transitoria del sistema en lazo cerrado.

El controlador obtenido es del orden 14, por lo que se observó que el controlador diseñado por el método H_∞ no cumple los requisitos para la dinámica del sistema en lazo cerrado.

2.5 Síntesis μ

Dado que el diseño anterior no cumple satisfactoriamente con todos los requisitos de desempeño, a continuación se utilizará el planteamiento del método *Síntesis μ* , porque las incertidumbres consideradas en este caso son altamente estructuradas. Para satisfacer los requisitos de desempeño robusto, es necesario un controlador de estabilización $K(s)$, de tal manera que en cada frecuencia ω es relevante en todo rango de frecuencias, como ocurre en la siguiente desigualdad del valor singular estructurado:

$$\mu_{\Delta p}[F_L(P, K)(j\omega)] < 1$$

La condición anterior garantiza un desempeño robusto del sistema de lazo cerrado, es decir,

$$\|\Phi(s)\|_\infty < 1$$

3. RESULTADOS

Los resultados de las iteraciones después de cada paso se muestran en la tabla 2. Después de tres iteraciones, el controlador obtenido es de orden 28.

Iteración	Orden controlador	Valor máximo de μ
1	14	1,73
2	18	1,072
3	28	0,808

Tabla 2. Resultados de las iteraciones D-K.

La respuesta de frecuencia del valor singular estructurado para el caso de estabilidad robusta se muestra en la figura 6. El máximo valor para μ es 0,441, lo que demuestra que bajo las incertidumbres paramétricas consideradas, la estabilidad del sistema de lazo cerrado se conserva.

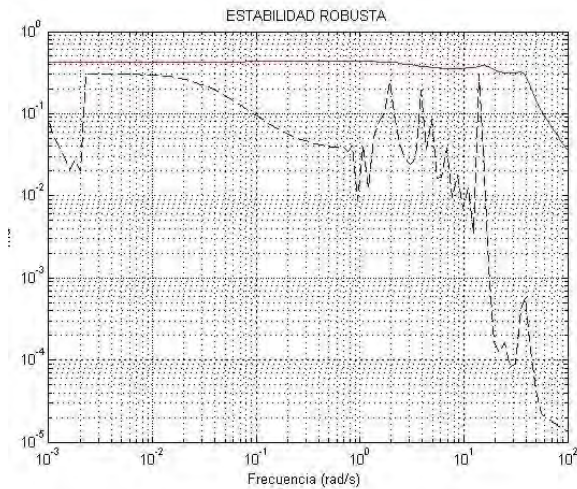


Figura 6. Estabilidad robusta del sistema lazo cerrado con K_μ .

La respuesta de frecuencia para el valor singular estructurado para el caso de desempeño robusto se muestra en la figura 7. El máximo valor de μ es 0,852, lo que demuestra que el sistema de lazo cerrado consigue un desempeño robusto. Este valor de μ es menor que el valor obtenido en el diseño H_∞ , es decir, el controlador diseñado por síntesis μ proporciona mejor solidez.

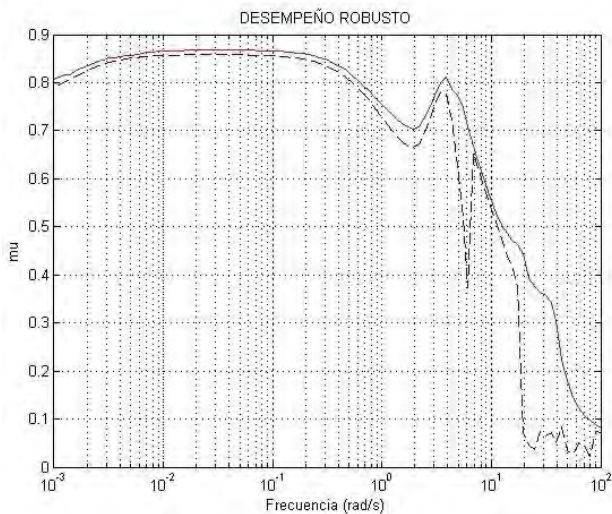


Figura 7. Desempeño robusto del sistema lazo cerrado con K_μ .

El ángulo de deflexión δ_z de control de las aletas en el sistema en lazo cerrado se muestra en la figura 8. La magnitud de este ángulo es inferior a 30 grados, que es el adecuado. El diseño del controlador por el método de síntesis μ puede ser utilizado en casos de un amplio rango de coeficientes para estos aparatos.

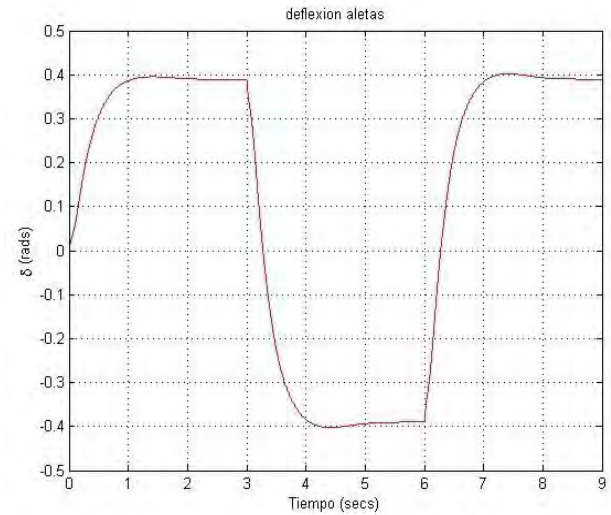


Figura 8. Señal de control de la deflexión de las aletas δ_z .

En la figura 9 se muestra la respuesta transitoria con respecto a la señal de referencia para un vuelo en una altura $h = 1000$ m.

Aunque hay una diferencia significativa en la dinámica de proyectiles entre estos dos casos y el caso de diseño, se muestra que el controlador puede ser diseñado y empleado para la estabilización del sistema para diferentes altitudes y velocidades, lo que simplifica la implementación del controlador.

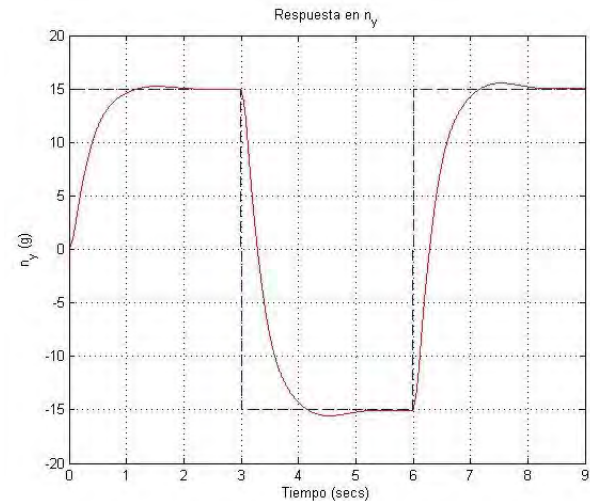


Figura 9. Respuesta del sistema para $H = 1000$ m, $t = 15$ s.

4. CONCLUSIONES

Ambos enfoques (la optimización H_∞ y la síntesis μ) pueden ser utilizados para diseñar controladores que, para un momento determinado de la dinámica de vuelo, logran la estabilidad robusta en el control de vuelo del proyectil en presencia de perturbaciones y ruido en los sensores. Sin embargo, el controlador H_∞ no puede garantizar un desempeño robusto en el caso dado. El controlador μ

alcanza la estabilidad robusta y desempeño robusto de sistema en lazo cerrado.

El controlador K_μ obtenido puede ser utilizado con éxito en diferentes altitudes y números Mach. No obstante, con el fin de controlar el proyectil eficientemente en el dominio de vuelo conjunto, puede ser necesario aplicar varios controladores, diseñados para diferentes condiciones de vuelo.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. A. Aponte, D. A. Amaya, A. R., Fonseca, y V. Prada. “Modelado, diseño y construcción de un sistema activo de control de estabilidad de bajo costo para aeronaves experimentales tipo aficionado”, Universidad Militar Nueva Granada, 2010.
- [2] C. Molins, J. Elso, I. Eguinoa, y M. García. “Control robusto QFT de una lanzadera espacial tipo Vega”, Universidad Pública de Navarra. 2010.
- [3] J. C. Doyle. “Analysis of feedback systems with structured uncertainties”, *IEEE Proc., Part D*, 129, pp 242-250, 1982.
- [4] G. Da-Wei, H. Petko, y M. Konstantinov. *Robust Control Design with Matlab®*. Springer. 2005.

EMISIONES EN REGÍMENES DE ESTADO ESTABLE DE DOS SISTEMAS QUE OPERAN CON MEZCLA E20 DE ETANOL-GASOLINA.

Steady state emissions from two systems operating with E20 ethanol-gasoline blend.

RESUMEN.

Este documento contiene información acerca del comportamiento de las emisiones y las prestaciones de un motor de combustión interna y un vehículo liviano, operados con mezcla etanol-gasolina en 15 estados estables de operación; también se presentan los resultados del cálculo de los índices de emisión en g/kW y g/kWh, a partir de las mediciones realizadas. Los estados estables de operación se establecieron conforme a combinaciones de la velocidad angular del motor y los porcentajes de carga a partir de la posición del acelerador. Esta metodología se plantea como alternativa para estudios sobre el comportamiento de distintas variables en motores de combustión interna.

Palabras clave: emisiones, etanol, gasolina, índices de emisión, motores de combustión interna.

ABSTRACT

This document contains information about the behavior of emissions and performance of an internal combustion engine and a light vehicle operated with ethanol-gasoline blends in 15 steady states of operation. The emission rates are calculated in g/kw and g/kWh, from the measurements obtained in lab stable operating conditions established at different combinations of the RPM of the motor and the percentages of the engine load. This methodology is an alternative in studies of the performance of different variables on internal combustion engines.

Keywords: emissions, ethanol, gasoline, emission index, internal combustion engines.

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo muestra los resultados del proyecto de investigación “Determinación de las emisiones en regímenes de estado estable de un vehículo liviano operando con mezcla E20 de etanol y gasolina”, desarrollado conjuntamente por el Grupo de Investigación en Gestión Energética (Genergética), de la Universidad Tecnológica de Pereira, y el Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz (CIMA) del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (Itesm), campus Toluca.

Índice de emisión es un factor que permite determinar la cantidad en gramos de determinada emisión cuando se genera una unidad de energía en kWh o se recorre 1 kilómetro en un vehículo con motor de combustión interna; de tal forma, las unidades de un índice de emisión son g/kWh o g/km. En este proyecto se determinaron las emisiones contaminantes en regímenes de estado estable, resultantes de la operación de un motor de combustión interna GM Z16SE y de un vehículo liviano Chevrolet Sail con motor de 1400 cc, que operaban, ambos, con una mezcla E20 de etanol-

JUAN ESTEBAN TIBAQUIRÁ

Ingeniero mecánico, Ph.D.
Profesor titular
Universidad Tecnológica de Pereira
juantiba@utp.edu.co

JOSÉ IGNACIO HUERTAS

Ingeniero mecánico, Ph.D.
Profesor titular
Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey - ITESM
jhuelas@itesm.mx

SEBASTIÁN OSPINA CASTRO

Ingeniero mecánico
Estudiante de Maestría en IM.
Profesor catedrático
Universidad Tecnológica de Pereira
sebaospina@utp.edu.co

LUIS FELIPE QUIRAMA

Ingeniero mecánico, M.Sc.
Profesor catedrático
Universidad Tecnológica de Pereira
luisfelipecuirama@utp.edu.co

gasolina. Se realizaron pruebas en 15 diferentes estados estables de operación. Las pruebas se realizaron bajo dos condiciones atmosféricas distintas, a 2660 msnm, en Toluca (México), y a 1410 msnm en Pereira (Colombia), representativas de las condiciones de operación de los vehículos que funcionan en centros poblados ubicados en alturas entre los 1000 y los 2000 msnm, como ocurre en gran parte de los territorios colombiano y mexicano. Las pruebas en Toluca se realizaron en el laboratorio del CIMA, usando el motor de combustión interna, mientras en Pereira fueron realizadas en el Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices (LPDA) adscrito al grupo Genergética.

El etanol, también denominado alcohol etílico, es una sustancia con fórmula molecular C_2H_5OH , que puede ser utilizado como combustible en motores de combustión interna con ignición de chispa (ciclo Otto): mezclas de gasolina, etanol anhidro y etanol puro, generalmente hidratado. En comparación con la gasolina, esta mezcla requiere un 16,5% más de calor para vaporizarse totalmente, lo que representa una dificultad en el momento de operar los motores a temperaturas muy bajas. Se espera que la eficiencia del motor aumente entre

el 1% y el 2% en relación con el desempeño con gasolina sin aditivo oxigenante, debido al mayor calor de vaporización de la mezcla E10 [1]. Para bajas concentraciones de etanol en la gasolina (<10%), se prevé un leve efecto sobre el consumo de combustible, pero para concentraciones más elevadas, del orden de 25% de etanol, que corresponde a un contenido energético 10% menor en volumen, se observa un aumento promedio del consumo entre el 3% y el 5%, si se le compara con la gasolina sin etanol. La combustión de las mezclas etanol-gasolina y del etanol puro, en comparación con las gasolinas sin aditivo oxigenante, produce menores emisiones de monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x), hidrocarburos no quemados (HC) y otros compuestos contaminantes, como resultado de una combustión más completa. Sin embargo, al mismo tiempo se elevan los aldehídos (compuestos del tipo R-CHO) y, dependiendo de las características del motor, los óxidos de nitrógeno (NO_x) [2, 3].

Las pruebas dinámicas de medición de emisiones con ciclos de manejo se realizan bajo condiciones controladas para obtener los valores en g/km de cada contaminante, luego de cumplir con el recorrido del ciclo. Como alternativa a las pruebas dinámicas, surgen los ciclos de estado estable que permiten tener períodos prolongados en puntos de operación del motor a velocidad y carga constantes, con lo que se le resta importancia a los períodos de transición de una velocidad a otra, en los cuales las emisiones y algunas variables de operación del motor no presentan tendencias claras. Mundialmente, se reconocen ciclos de estado estable para probar motores diésel, y se les clasifica según la cantidad de modos de operación de cada ciclo. Los ciclos japoneses de 6 o 13 modos están entre algunos de los que primero se tiene registro; posteriormente el ECE R49 de 13 modos planteado por la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa, y que fue reemplazado por el European Steady-state Cycle (ESC), es el ciclo de estado estable más reciente del cual se tiene conocimiento [3]. El ESC consiste en un conjunto de 13 modos de estado estable de operación corridos consecutivamente durante un tiempo preestablecido y empleando un factor de ponderación en cada modo; al final, se agrupan los resultados obtenidos en la medición de emisiones en cada modo de operación y se tratan para ser reportados en g/km. Los ciclos de estado estable reconocidos mundialmente, además de ser sugeridos para el análisis de motores diésel, son una prueba dinámica de emisiones y no reportan información sobre las emisiones en cada estado estable de operación. Por lo anterior, en esta investigación se estableció una nueva matriz de puntos de prueba, que cubra varias velocidades y condiciones de carga y permita obtener resultados del comportamiento del vehículo en cada uno de los modos de estado estable de operación.

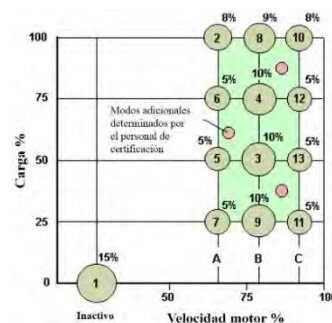


Figura 1. Ciclo ESC en estado estable, según norma europea[4].

2. METODOLOGÍA

Los montajes experimentales difieren dependiendo del laboratorio en el cual se realicen las pruebas, debido a los equipos con los que cuenta cada centro de investigación. En las Figura 2 y 3 se presentan los esquemas de los dos montajes experimentales realizados.

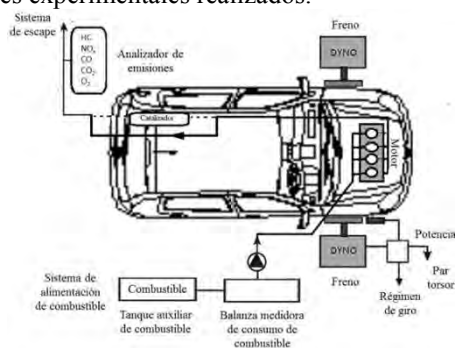


Figura 2. Montaje experimental LPDA, en la UTP de Pereira.

Con el fin de cubrir varios puntos de estado estable del rango de funcionamiento del motor de combustión interna, se realizaron pruebas en cuatro regímenes de revoluciones, medidos con el tacómetro del motor, así como en igual número de puntos de carga del motor, estimados según la posición del acelerador, que en este estudio fue controlada a partir de las señales del sensor TPS (*Throttle Position Sensor*, sensor de posición de la mariposa de aceleración). La Tabla 1 muestra los regímenes de estado estable que se evaluaron para los dos sistemas (motor y vehículo).

TPS	RPM			
	1500	2500	3500	4500
25%	x	x	x	----
50%	x	x	x	x
75%	x	x	x	x
100%	x	x	x	x

Tabla 1. Matriz de pruebas.

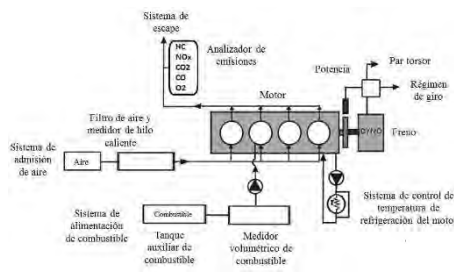


Figura 3. Montaje experimental CIMA Itesm - Toluca

La Tabla 2 muestra las características de los sistemas probados.

Característica	Chevrolet Sail / LPDA Pereira	Chevy / CIMA Toluca
Tipo de motor	1,4 litros DOHC	GM Z16SE
Desplazamiento [cm ³]	1 398	1 597
Orientación	Transversal	Longitudinal
Relación de compresión	10,2 a 1	9,4 a 1
Diámetro de cilindro / Carrera	79,8 mm / 81,8 mm	-
Distribución	4 válvulas por cilindro / 2 árboles de levas en la culata	2 válvulas por cilindro / 1 árbol de levas en la culata
Sistema de combustible	Inyección electrónica indirecta	Inyección electrónica secuencial multipunto
Tipo de combustible	Gasolina	Gasolina
Potencia máxima	76 kW / 6000 rpm	74,5 kW / 5600 rpm
Par torsor	130 Nm / 4200 rpm	135,6 Nm / 3200 rpm

Tabla 2. Motores probados

Para contar con un punto de comparación entre la teoría y los resultados prácticos, se adoptó una metodología de cálculo de los índices de emisión en g/km y g/kWh.

La comparación teórica se dividió en tres partes:

- Recopilación de la información necesaria producto de experiencias anteriores.
- Cálculo de las emisiones en concentración volumétrica y valores de las prestaciones del motor bajo el modelo generado por el CIMA.
- Cálculo de los índices de emisión en g/km y g/kWh, apoyados en la metodología generada por el grupo de investigación Genergética de la UTP.

La recopilación de la información necesaria producto de experiencias anteriores aportó datos importantes para el cálculo teórico de los índices de emisión como:

- Presión de admisión para cada estado estable de operación del motor.
- Dimensiones de la cámara de combustión y relación de compresión del motor de pruebas.
- Condiciones ambientales (presión y temperatura).

- Poder calorífico inferior de los combustibles de prueba.
- Relación estequiométrica aire-combustible para el combustible de pruebas.
- Exceso de aire (λ), medido para cada estado estable de operación.

Con los datos anteriores se empleó un modelo simulador de combustión, generado por el grupo de investigadores del CIMA, cuyo objetivo es predecir el desempeño mecánico, energético y ambiental del motor de combustión interna cuando opera con diferentes combustibles. Este modelo surge como una alternativa a los supuestos comunes del ciclo Otto, que normalmente se emplean para realizar análisis teóricos de la combustión. Apoyados en los cálculos de los modelos teóricos del ciclo Otto, en la adaptación desarrollada por el CIMA, y cuando se les compara con los resultados experimentales adquiridos por medio de un sensor de presión tipo bujía instalado en la cámara de combustión, se obtuvo la siguiente gráfica Pvs.V del ciclo Otto, en la cual se puede apreciar la aproximación del ciclo que representa al modelo CIMA, con el ciclo graficado a partir de los datos obtenidos experimentalmente (Figura 4).

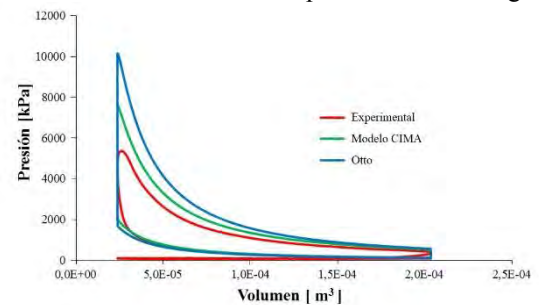


Figura 4. Diagrama P-V que compara el ciclo teórico Otto con el modelo CIMA.

Los cálculos teóricos de las prestaciones del motor se realizaron utilizando el programa Engineering Equation Solver (EES), mientras que la temperatura de combustión T_3 , al igual que la concentración volumétrica de los gases producto de la combustión, se obtuvieron utilizando el programa de equilibrio químico Gaseq, el cual se alimenta con las fracciones molares de los reactivos de la combustión y las condiciones iniciales para obtener T_3 ; posteriormente se ingresan las condiciones ambientales de salida de los gases producto de la combustión, y este programa calcula las fracciones volumétricas de las emisiones. De esta forma se obtuvieron los datos teóricos de la concentración de CO, CO₂, O₂ y NO (para el caso de los NO_x), y de CH₄ en representación de los HC que se reportaron en este estudio. Luego de la obtención con Gaseq de las concentraciones volumétricas de los gases, y con EES del flujo másico de combustible, de la potencia y las demás variables necesarias, se procedió a calcular los índices de emisión a partir del balance de materia, con una herramienta diseñada en EES por el Grupo de Investigación en Gestión Energética (Genergética) de la UTP. En esta parte se procedió de

igual manera que con el cálculo de los índices de emisión teóricos, utilizando la herramienta EES, diseñada por Genergética, pero en esta oportunidad a partir de los datos de emisiones, flujo de combustible y prestaciones medidos en el motor y el vehículo en cada laboratorio.

Para determinar los valores promedio de cada una de las mediciones de emisiones, consumo de combustible y desempeño, en los 15 estados estables de operación bajo los cuales se probaron el motor GM Z16SE en Toluca y el vehículo Chevrolet Sail en Pereira, se realizaron 6 repeticiones. Asumiendo un comportamiento normal en la distribución de los resultados pero teniendo en cuenta lo reducido del tamaño de la muestra, se realizó el análisis estadístico de los resultados por medio de la distribución "T" de student con un intervalo de confianza del 95%, para probar las hipótesis de esta investigación. Este análisis estadístico exige al menos 6 datos, los cuales permiten tener 5 grados de libertad (n-1) y plantear así el nivel de intervalo de confianza esperado.

3. RESULTADOS

3.1 Resultados de las pruebas en Toluca

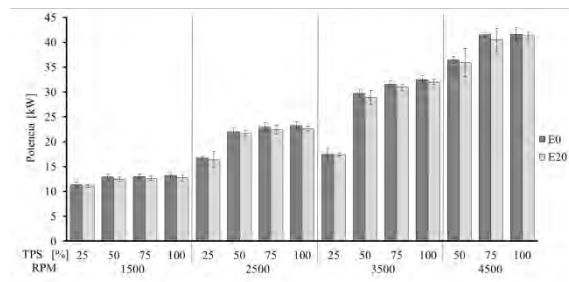


Figura 5. Potencia en las pruebas CIMA Itesm.

En la Figura 5 se aprecia una disminución promedio del 1,9% en la potencia cuando se usa mezcla E20, frente a la gasolina sin etanol.

Con el aumento de la velocidad de giro del motor se presenta un incremento en la potencia tanto con E20 como con E0, pero se observa una mayor variación en la potencia entre E20 y E0 a bajos regímenes de giro. Para el motor probado en Toluca, la máxima disminución en la potencia con E0 fue del 3,17% y se presentó a 1500 rpm y 100% de carga.

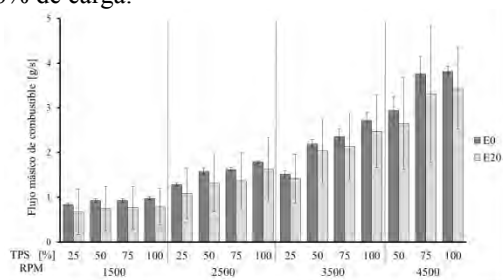


Figura 6. Flujo másico de combustible en las pruebas CIMA Itesm.

Para los 15 estados estables de operación con el motor GM Z16SE en el CIMA-Itesm Toluca, se registró en promedio una disminución del 12,89% en el flujo másico de combustible E20 respecto a E0, y a 1500 rpm y 25% de carga se registró la mayor disminución, del 19,63% (Figura 6). A su vez, en la Figura 7 se aprecia que, con el motor GM Z16SE ensayado en Toluca, se registró una disminución promedio con E20 respecto a E0 en la concentración volumétrica de CO₂ en las emisiones, así como en los índices de emisión, medidos en g/kWh y g/km, del 4,94%, 18,38% y 20,05% respectivamente, y se aprecia la mayor disminución en los índices de emisión a 1500 rpm y 50% de carga entre todos los 15 puntos de estado estable probados con el motor en Toluca, con una variación cercana al 40% para ambos índices (g/kWh y g/km) de E20 a E0.

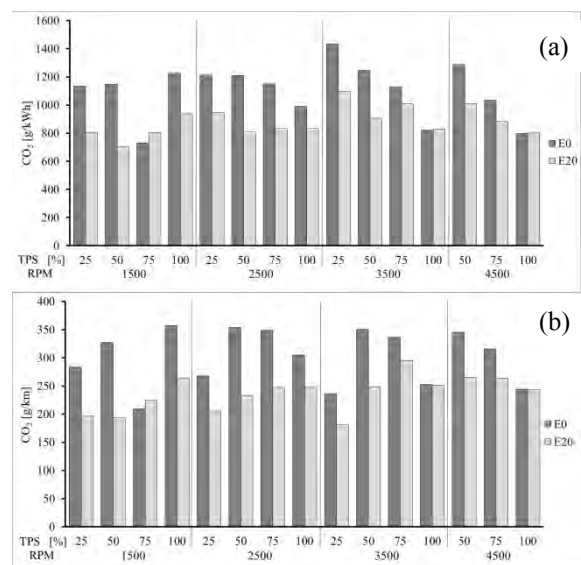
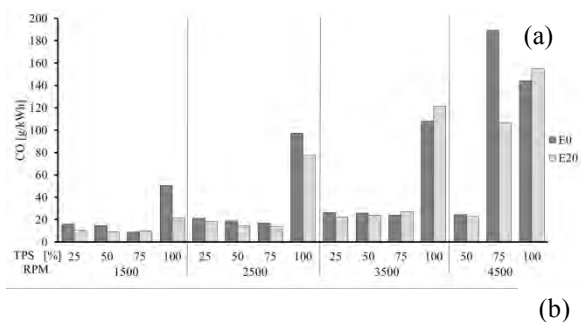


Figura 7. Pruebas de CO₂ en CIMA Itesm: (a) g/kWh, y (b) g/km.

La Figura 8 muestra que con el motor de Toluca se registró, con E20, una tendencia al aumento del CO del 1,8%, 15,69% y 17,63% para la concentración volumétrica, así como para los índices de emisión en g/kWh y g/km respectivamente; a 4500 rpm y 75% se presentó la mayor disminución en los índices de emisión con E20 respecto a E0, tanto en g/kWh como en g/km.



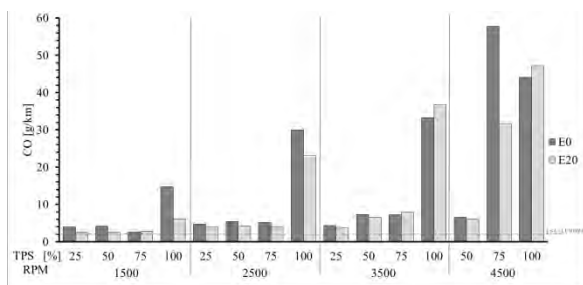


Figura 8. Pruebas de CO en CIMA Itesm: (a) g/kWh, (b) g/km.

En promedio se registró una disminución en los HC, tanto en las mediciones en concentración volumétrica como en los índices de emisión en g/kWh y g/km., del orden de 5,74%, 9,27% y 11,07% respectivamente Figura 9).

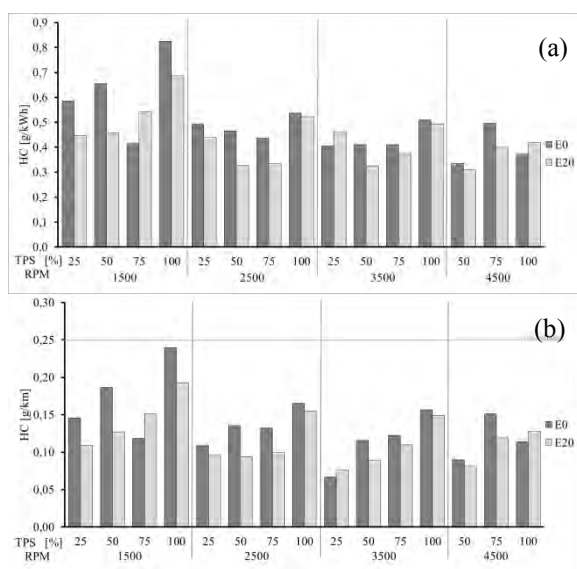


Figura 9. Pruebas de HC en CIMA – Itesm: (a) g/kWh, (b) g/km.

3.2 Resultados de las pruebas en Pereira

En Pereira, la potencia del vehículo fue medida con un dinamómetro de cubos Dynapack y se registró en promedio un aumento del 0,9% cuando se utiliza E20 frente al E0 (gasolina sin etanol), tal como se muestra en la Figura 10.

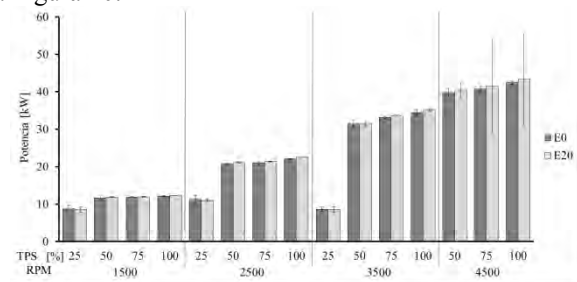


Figura 10. Potencia en las pruebas LPDA-UTP.

Solo en 3 de los 15 estados estables de operación se registró una disminución en la potencia, de acuerdo con

lo presentado Figura 10, donde se aprecia este descenso en los tres estados de prueba con 25% de carga, debido a la baja cantidad de combustible con que opera el motor del vehículo en esas condiciones. Esto mostraría que, a bajos flujos de combustible, la incidencia del porcentaje de etanol en la mezcla etanol-gasolina es baja con respecto al combustible sin etanol en iguales condiciones de prueba.

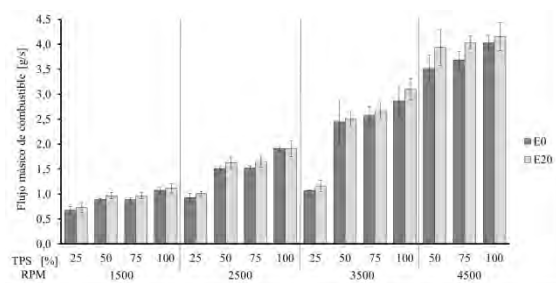


Figura 11. Flujo másico de combustible pruebas LPDA UTP.

Con el vehículo Chevrolet Sail de Pereira se registró en promedio un aumento del flujo másico de combustible del 6,7%, con E20 respecto a E0, al analizar los 15 estados estables de operación ensayados Figura 11).

La Figura 12 muestra que, en promedio, para el motor del vehículo Chevrolet Sail probado en Pereira, el CO₂, con E20, aumentó la concentración volumétrica, los índices de emisión en g/kWh y g/km en 3,12%, 7,3% y 8,2% respectivamente, registrando el mayor aumento en los índices de emisión de CO₂ a 1500 rpm y 25% de carga.

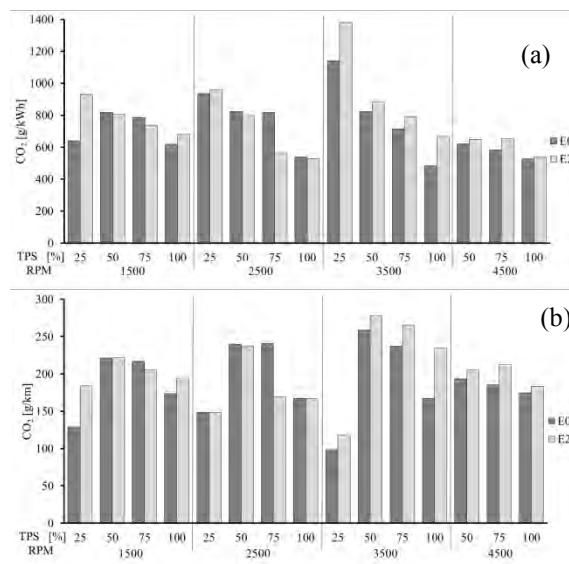


Figura 12. Pruebas de CO₂ en LPDA-UTP: (a) g/kWh, (b) g/km.

El Chevrolet Sail registró en promedio, cuando se usa E20 y respecto al E0, una disminución en la emisión de CO del 16,35%, 12,76% y 12,1% en las emisiones medidas en concentración volumétrica (%), así como en los índices de emisión medidos en g/kWh y g/km respectivamente, como se aprecia en la figura 13.

En nueve de los 15 estados estables de operación ensayados, se registraron, para el vehículo de pruebas operado con combustible E20, emisiones por debajo del límite establecido por la legislación colombiana, lo cual es un factor favorable para la mezcla de etanol-gasolina probada. Si se compara el E20 con el E0, la mayor disminución de CO con el vehículo Chevrolet Sail ensayado en Pereira se registró a 3500 rpm y 50% de carga.

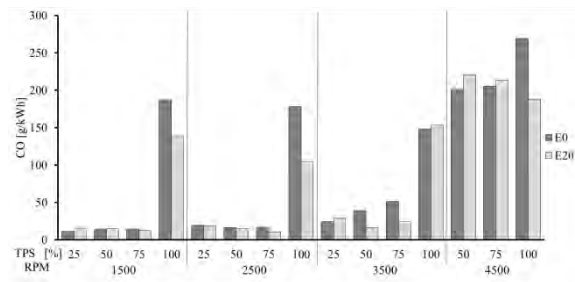
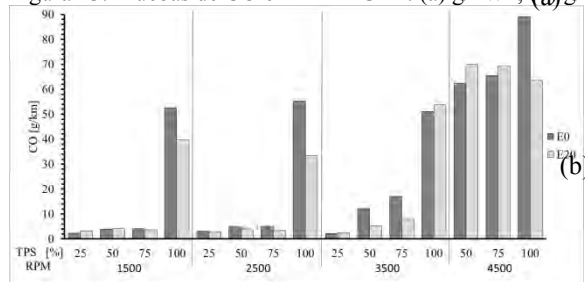


Figura 13. Pruebas de CO en LPDA UTP: (a) g/kWh, (b) g/km.



El cálculo de los índices de emisión de HC estableció la disminución de estos, medidos tanto en g/kWh como en g/km, y se acerca a 2,01% y 1,18% respectivamente. A 2500 rpm y 75% de carga se presentó el estado estable de operación con la mayor disminución en estos índices para el E20 respecto al E0.

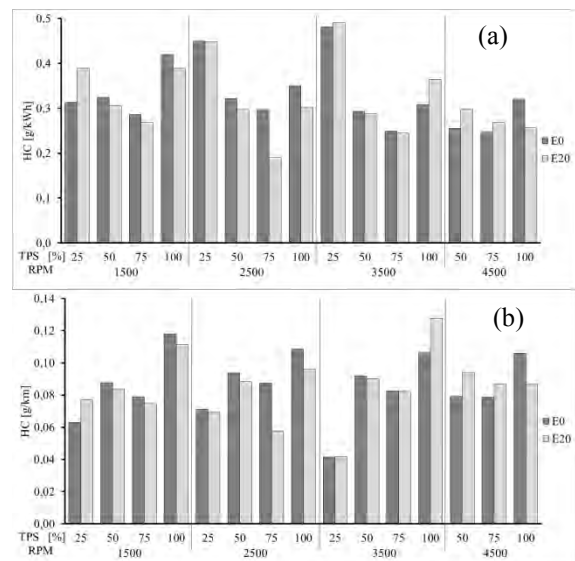


Figura 14. Pruebas de HC en LPDA-UTP: (a) g/kWh, (b) g/km.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Cada uno de los dos motores probados tiene programada su inyección de combustible de modos distintos y la medición de las emisiones se realizó antes de los convertidores catalíticos, lo que puede causar diferentes tendencias en los resultados de las emisiones.
- La potencia registró un leve cambio con el E20 respecto al E0, con diferente comportamiento en los dos escenarios de prueba. En Pereira, con el motor del Chevrolet Sail se registró un aumento, mientras que en Toluca se presentó una disminución con el motor del Chevy; esto es propio de la programación de cada motor y se debe al trabajo en altura al que es sometido el motor en Toluca.
- El flujo másico de combustible presentó un aumento con E20 en el vehículo probado en Pereira, mientras que registró una disminución en el motor ensayado en Toluca, lo que está de acuerdo con los resultados de la potencia, dado que para obtener mayor potencia comúnmente es necesario un aumento en el flujo de combustible adicionado a la combustión.
- El motor del Chevrolet Sail probado en Pereira funciona en la mayoría de estados estables de operación bajo condiciones de mezcla pobre en combustible, debido a su programación de inyección para disminuir el consumo de combustible y regular las emisiones; el aumento de potencia y flujo másico de combustible para la mezcla etanol-gasolina se debe a las características de aditivo oxigenante del etanol, reflejadas en una combustión más completa, que se evidencian en un aumento de las emisiones de CO_2 y en una disminución de las emisiones de CO y HC.
- El motor del Chevy probado en el CIMA Itesm - Toluca registró una disminución de la potencia y el flujo másico de combustible para la mezcla etanol-gasolina, reflejada en una combustión incompleta que se manifiesta en una disminución de las emisiones de CO_2 y el aumento de las emisiones de CO y HC. Todo esto ocurre debido a la programación de la inyección de combustible del motor, diseñada para operar con mezcla rica, así como a la menor presencia de oxígeno debida a la menor presión atmosférica en Toluca respecto a Pereira.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A.P.I.. API, "Alcohol and ethers, a technical assessment of their application as fuel and fuel components", Washington, 1998.
- [2] T.J.G.L.Q.L.O.S. Rios L.C, "Protocolo E20", Universidad Tecnológica de Pereira, Grupo de Investigación en Gestión Energética (Genergética), Pereira, 2012.
- [3] C. y Bndes, "Bioetanol de caña de azúcar - Energía para el desarrollo sostenible", Rio de Janeiro, 2008.

- [4] Dieselnet, "Dieselnet", 2013. [En línea]. Tomado de:
<https://www.dieselnet.com/standards/cycles/#us-ld>.
Último acceso: 2013.
- [5] M. y Goldemberg "The Brazilian Alcohol Program -
An overview", *Energy for Sustainable Development*,
vol. 1, nº. 1, 1994.

ANÁLISIS BIOMECÁNICO Y SIMULACIÓN DE LA RODILLA PROTÉSICA

Biomechanical analysis and simulation of prosthetic knee

RESUMEN

La simulación virtual se ha convertido en una herramienta importante en el estudio de diferentes tipos de sistemas. En el campo de la medicina, el uso de estas herramientas virtuales permite mostrar el comportamiento mecánico de diversos elementos fisiológicos. En este trabajo se presentan los resultados del análisis biomecánico de una rodilla con prótesis y se hace énfasis en el movimiento de flexión de esta articulación. El análisis incluye una simulación del comportamiento de la rodilla protésica con componentes elásticos y la estimación de esfuerzos por elementos finitos; los resultados muestran factores de seguridad confiables para el estudio aplicado.

Palabras clave: artroplastia, análisis de movimiento, rodilla protésica, simulación de esfuerzos.

ABSTRACT

Virtual simulation has become an important tool in the study of different types of systems. In the field of medicine, the use of these tools allow to show the mechanical behavior of various physiological elements. In this paper, the results of biomechanical analysis of knee prosthesis are presented, focusing in the bending of the joint. The analysis includes a simulation of prosthetic knee with elastic components and estimation of efforts by finite elements; the results show reliable safety factors applied for the study.

Keywords: arthroplasty, motion analysis, prosthetic knee, stress simulation.

1. INTRODUCCIÓN

Las afecciones o enfermedades articulares, por ejemplo el desgaste de cartilago, frecuentes en personas mayores, generan complicaciones y dificultades en el movimiento. Cuando son muy graves, es necesario realizar una cirugía de reemplazo parcial o total de la rodilla, también llamada artroplastia. Esta intervención quirúrgica se caracteriza por aplicar varios cortes al hueso con el objetivo de remover el área afectada y sustituirla por prótesis. De igual manera, los ligamentos cruzados y los meniscos son reemplazados por materiales que permiten un movimiento similar al normal o fisiológico [1], [2].

Considerando lo anterior, es necesario analizar el comportamiento mecánico de la prótesis en relación con la articulación, con el propósito de determinar los mayores esfuerzos y comprender mejor su funcionamiento. Para realizar este análisis se debe partir de modelos semejantes a los reales de la rodilla protésica. La investigación desarrollada en [3] parte de imágenes de resonancia magnética (MRI) para la generación de modelos virtuales, que, mediante análogos, son observados con gran detalle y en tres dimensiones, lo que, adicionalmente, facilitó el reconocimiento e identificación de tumores. En [4] se elaboran los cuatro componentes básicos de la prótesis, es decir, el elemento blando que se sitúa en medio de la articulación y las partes que se implantan en la tibia, el fémur y la rótula.

DANIEL CASTILLO

Ingeniero en Mecatrónica
Asistente de investigación
Universidad Militar Nueva Granada
U1801256@unimilitar.edu.co

OLGA RAMOS

Ingeniera electrónica, Ph.D. (c)
Investigador principal
Universidad Militar Nueva Granada
Olga.Ramos@unimilitar.edu.co

Para ese estudio se partió de las dimensiones características de la rodilla, lo que permitió establecer datos significativos en el movimiento de la articulación.

Con el modelo virtual de la articulación, algunas investigaciones recientes han analizado el comportamiento mecánico de los meniscos, y han comparado las tensiones presentadas en relación con el ángulo de flexión de la rodilla [5]. Igualmente, en [6] se propone una simulación del movimiento de la rodilla, y se comparan esos valores con los de la pierna de un cerdo, tras lo cual se observaron aproximaciones cercanas. Similarmente, en [7] se propone un modelo con la prótesis considerando la rigidez de cada elemento. En esa investigación, los resultados comparan la tensión de cada parte anatómica con el ángulo de flexión de la rodilla. Asimismo, en [8] se observa un desarrollo dirigido hacia el estudio de prótesis, en donde se analizan cinco tipos de estructuras y se comparan los ángulos máximos de flexión, tras lo cual se determina un máximo de 136,3°.

Teniendo en cuenta la función del ligamento cruzado posterior, después de la inserción del reemplazo total de rodilla, en [9] se estudió su comportamiento con 11 pacientes con avanzada osteoartritis, y se concluyó que el movimiento biomecánico presenta algunos inconvenientes después de la cirugía.

Considerando el movimiento de la articulación en la marcha, algunas investigaciones aportan modelos precisos de su comportamiento. En [10], el análisis se representó con un modelo de bisagra, en el cual el fémur actúa como un elemento estático, y la tibia como un elemento móvil; igualmente, en este estudio se tuvo en cuenta el desplazamiento del eje de rotación en relación con el recorrido de un individuo. Similarmente, en [11] se propuso un método para simular el paso de una persona, con el fin de determinar si este movimiento puede ser descrito con deformaciones elásticas razonables.

El presente trabajo ilustra la simulación de esfuerzos y el análisis del movimiento de una rodilla protésica. La investigación se inicia con la reconstrucción virtual de la rodilla, tomando como base imágenes de resonancia magnética, para el posterior desarrollo de la prótesis femoral, patelar, tibial y del inserto. Después se realiza un estudio del movimiento y, con análisis de elementos finitos, se calculan los esfuerzos más significativos en la estructura, con el objetivo de determinar los posibles puntos de falla que puedan afectar el comportamiento de la articulación.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

En la siguiente sección se describen los procedimientos realizados para la reconstrucción virtual de la articulación, la simulación del movimiento, el análisis por elementos finitos; además, se presentan los resultados mecánicos de la estructura.

2.1 Reconstrucción virtual de la rodilla protésica

Para la simulación del modelo de la rodilla, es necesario tener en cuenta las partes anatómicas que componen dicha articulación: el fémur, la rótula, la tibia y el peroné. De ahí que el desarrollo virtual de estos tejidos biológicos duros parta de imágenes de resonancia magnética (MRI), las cuales permiten percibir de forma clara las dimensiones reales de estos componentes. A través del *software* ITK-SNAP, se visualizaron y delinearon los contornos óseos de las imágenes MRI de la rodilla, con el propósito de obtener la segmentación de dichos contornos para ser exportados al *software* de reconstrucción CGAL y así generar las superficies de la articulación.

Una vez obtenidos el modelo virtual de la rodilla y las medidas características de la misma, se utilizó el programa Solidworks® para dimensionar, delimitar y ensamblar los componentes femoral, tibial, patelar e inserto de la prótesis. La integración final se ilustra en la Figura 1.

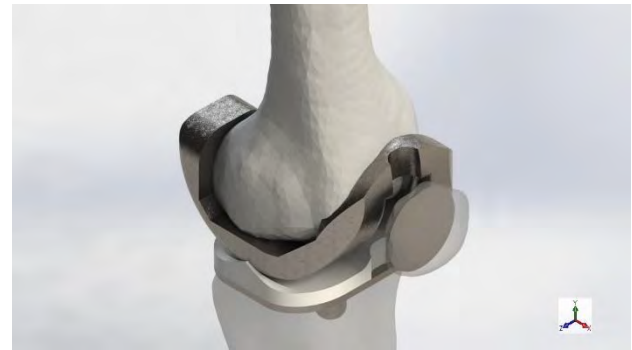


Figura 1. Reconstrucción virtual de la rodilla protésica

Las medidas del modelo fueron comparadas con prótesis comerciales y las dimensiones significativas se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Tabla 1. Medidas significativas de la prótesis.

Componente femoral		Componente tibial		Componente patelar	
A/P	M/L	A/P	M/L	Diámetro	Espesor
74 mm	80 mm	52,5 mm	82 mm	32 mm	8 mm

2.2 Simulación de movimiento

Para la simulación del movimiento y basados en los resultados obtenidos en [7], se consideró que el comportamiento de los ligamentos laterales de la rodilla es análogo al de los resortes mecánicos. De igual manera, se estableció en la simulación un valor de rigidez del resorte principal, que reemplaza al ligamento colateral medio, de 100 N/mm. Además, se aplicaron restricciones que permitieron simular el movimiento de la rodilla. En el espacio de trabajo, la tibia y el componente protésico anexado a esta se consideraron como cuerpos rígidos, debido a que este estudio está orientado al análisis de flexión de la articulación. Las fuerzas provenientes de la rótula y sus ligamentos, aunque intervienen en el movimiento de flexión, no hacen un aporte significativo al mismo; por lo tanto, para el presente análisis fueron omitidos [12], [13].

Los resultados obtenidos se examinaron con un rango del ángulo de flexión de la rodilla de 0 a 120°, considerando el movimiento normal de la rodilla [14], [15]. La fuerza ejercida por el resorte principal se muestra en la Figura 2, en la que se puede analizar que el comportamiento de esta presenta una respuesta creciente hasta sobrepasar ligeramente los 90°, debido a que en este punto el resorte comienza a contraerse.

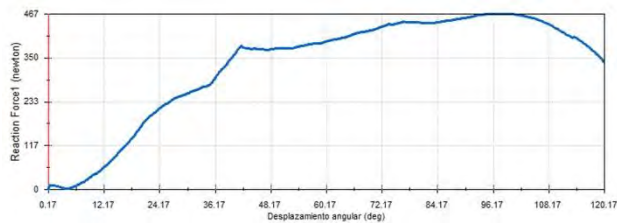


Figura 2. Fuerza del resorte

La figura 3 ilustra el desplazamiento del eje de rotación del fémur en el eje X, con el objetivo de visualizar su comportamiento respecto al movimiento de la rodilla sin prótesis. Se observa que para el estudio aplicado el rango de desplazamiento es de 12 mm y, aunque al principio la articulación presenta una disminución considerable en el mismo, a partir de los 42°, la fuerza del resorte realiza el ajuste correcto de su posición.

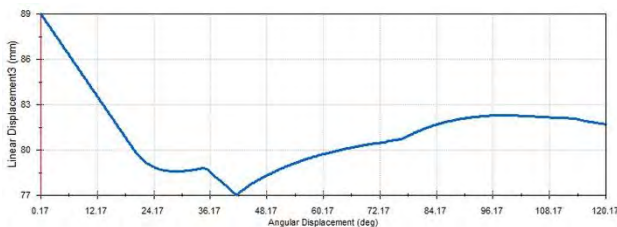


Figura 3. Desplazamiento del eje de rotación del fémur.

2.3 Análisis por elementos finitos (FEA)

Para el desarrollo se aplicó el método de elementos finitos (FEM), con el propósito de determinar los esfuerzos y las deformaciones principales en la estructura. Para realizar el análisis se aplicó una sujeción de bisagra al componente unido al fémur, que, a diferencia de una sujeción de rodillos, produce desplazamientos despreciables y aunque en el fémur se presentan pequeñas traslaciones, en el estudio aplicado se disminuirían los valores y presentaría datos correctos. Para el componente anexo a la tibia se estableció una sujeción fija, para brindar estabilidad al sistema, teniendo en cuenta el movimiento de flexión de la articulación; adicionalmente, se consideró que el peso del fémur correspondía a 7,5 kg [16].

3 RESULTADOS

En la Figura 4 se visualizan los esfuerzos que se presentan en el inserto de polietileno de alta densidad cuando la articulación se encuentra en un ángulo de flexión de 0°. Se observa que los valores máximos se presentan en los puntos de contacto con el componente femoral y, aunque son significativamente mayores que en la superficie en general, el factor de seguridad F_s proporciona datos correctos en la estructura, como se determina en la ecuación 1, donde σ_{VonMises} es el esfuerzo presentado y σ_{limit} es el esfuerzo límite del

componente; dado que el material es polietileno de alta densidad, se considera una magnitud de 20 MPa [17].

$$F_s = \frac{\sigma_{\text{limit}}}{\sigma_{\text{VonMises}}} = \frac{20 \text{ MPa}}{1,82 \text{ MPa}} = 10,99 \quad (1)$$

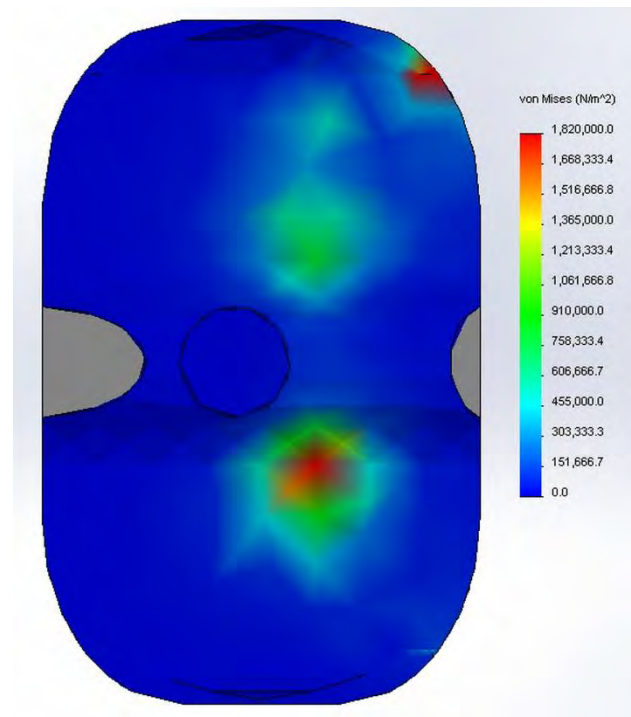


Figura 4. Esfuerzos del inserto de polietileno.

De la Figura 5 se deduce que el componente unido a la tibia presenta esfuerzos mayores debido a la carga proporcionada por la rodilla. Pero considerando que el material del componente es una aleación de titanio, se estima un $\sigma_{\text{limit}} = 170 \text{ MPa}$ y, con base en (1), se determina que el factor de seguridad no representa ningún riesgo ($F_s = 11,14$) [18].

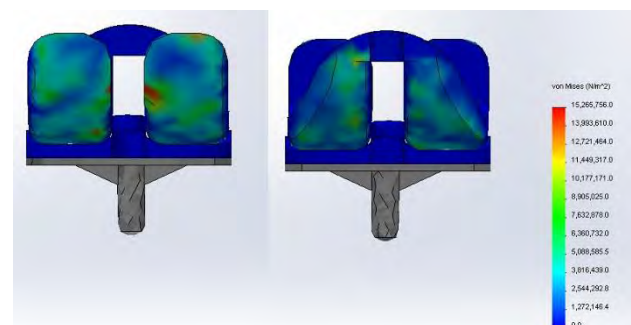


Figura 5. Esfuerzos del componente fijado a la tibia.

Los desplazamientos presentados en el análisis se observan en la Figura 6. Los mayores valores se presentan en la prótesis anexo a la tibia; esto se debe a que el componente se está tratando con una sujeción de bisagra.

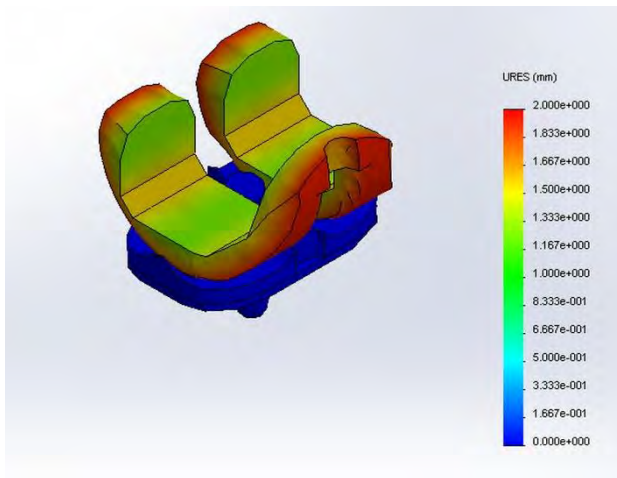


Figura 6. Desplazamiento de la prótesis de rodilla.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados muestran datos positivos en la aplicación de la prótesis. Se observa que el esfuerzo presentado por la masa de la rodilla se distribuye uniformemente en toda la superficie del componente femoral; además, las deformaciones o desplazamientos de los componentes son mínimas, por lo que se puede concluir que la prótesis no presenta ningún riesgo en el estudio realizado. Cabe destacar que en el análisis no se tuvo en cuenta la interacción de otros elementos, por ejemplo los músculos, cuya intervención puede disminuir la fatiga y los esfuerzos que se presentan. Por lo tanto, en futuras investigaciones se propone investigar el efecto de dichos elementos.

Agradecimientos

A la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada, por la financiación del proyecto ING 1573, año 2014.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. J. Carr, O. Robertsson, S. Graves, A. J. Price, N. K. Arden, A. Judge y D. J. Beard, "Knee replacement", *The Lancet*, vol. 379, n° 9823, pp. 1331-1340, 2012.
- [2] P. Cram, X. Lu, S. L. Kates, J. A. Singh, Y. Li y B. R. Wolf, "Total knee arthroplasty volume, utilization, and outcomes among Medicare beneficiaries, 1991-2010", *JAMA*, vol. 308, n° 12, pp. 1227-1236, 2012.
- [3] T. M. Qiu, Y. Zhang, J. S. Wu, W. J. Tang, Y. Zhao, Z. G. Pan, Y. Mao y L. F. Zhou, "Virtual reality presurgical planning for cerebral gliomas adjacent to motor pathways in an integrated 3-D stereoscopic

visualization of structural MRI and DTI tractography", *Acta Neurochirurgica*, vol. 152, n° 11, pp. 1847-1857, 2010.

- [4] K. J. Lin, C. H. Huang, Y. L. Liu, W. C. Chen, T. W. Chang, C. T. Yang, Y. S. Lai y C. K. Cheng, "Influence of post-cam design of posterior stabilized knee prosthesis on tibiofemoral motion during high knee flexion", *Clinical Biomechanics*, vol. 26, n° 8, pp. 847-852, 2011.
- [5] O. Tanifuji, T. Sato, K. Kobayashi, T. Mochizuki, Y. Koga, H. Yamagiwa, G. Omori y N. Endo, "Three-dimensional in vivo motion analysis of normal knees using single-plane fluoroscopy", *The Japanese Orthopaedic Association 2011*, vol. 16, n° 6, pp. 710-718, 2011.
- [6] H. C. Chen, C. H. Wu, C. K. Wang, C. J. Lin y Y. N. Sun, "A Joint-Constraint Model-Based System for Reconstructing Total Knee Motion", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 61, n° 1, pp. 171-180, January 2014.
- [7] A. Steinbrück, M. Woiczinski, P. Weber, P. E. Müller, V. Jansson y C. Schröder, "Posterior cruciate ligament balancing in total knee arthroplasty: a numerical study with a dynamic force controlled knee model", *Biomedical engineering online*, vol. 13, n° 1, pp. 91-104, 2014.
- [8] H. Mizu-uchi, C. W. C. Jr., S. Matsuda, C. Flores-Hernandez, Y. Iwamoto y D. D. D'Lima, "Effect of total knee arthroplasty implant position on flexion angle before implant-bone impingement", *The Journal of Arthroplasty*, vol. 26, n° 5, pp. 721-727, 2011.
- [9] B. Yue, K. M. Varadarajan, H. E. Rubash y G. Li., "In vivo function of posterior cruciate ligament before and after posterior cruciate ligament-retaining total knee arthroplasty", *International Orthopaedics*, vol. 36, n° 7, pp. 1387-1392, 2012.
- [10] M. A. Gómez y H. G. Alvarado, "Análisis de la marcha en la rodilla por medio de la tecnología ZigBee", *Revista Colombiana de Física*, vol. 42, n° 2, pp. 97-101, 2010.
- [11] A. Ribeiro, J. Rasmussen, P. Flores y L. F. Silva, "Modeling of the condyle elements within a biomechanical knee model" *Multibody System Dynamics*, vol. 28, n° 1-2, pp. 181-197, 2012.
- [12] M. Abolghasemian, S. Samiezadeh, A. Sternheim, H. Bougherara, C. L. Barnes y D. J. Backstein, "Effect of patellar thickness on knee flexion in total knee arthroplasty: a biomechanical and experimental study", *The Journal of Arthroplasty*, vol. 29, n° 1, pp. 80-84, 2014.
- [13] Y. Zhu, J. X. Chen, S. Xiao y Edward B. Mac Mahon, "3D knee modeling and biomechanical simulation" *Computing in Science & Engineering*, vol. 1, n° 4, pp. 82-87, 1999.

- [14] J. Zelle, A. C. V. d. Zanden, M. D. W. Malefijt y N. Verdonschot, "Biomechanical analysis of posterior cruciate ligament retaining high-flexion total knee arthroplasty", *Clinical Biomechanics*, vol. 24, nº 10, pp. 842-849, 2009.
- [15] K. Takayama, T. Matsumoto, S. Kubo, H. Muratsu, K. Ishida, T. Matsushita, M. Kurosaka y R. Kuroda, "Influence of intra-operative joint gaps on post-operative flexion angle in posterior cruciate-retaining total knee arthroplasty", *Knee Surg Sports Traumatol Arthroscopy*, vol. 20, nº 3, pp. 532-537, March 2012.
- [16] K. B. Shelburne y M. G. Pandey, "A musculoskeletal model of the knee for evaluating ligament forces during isometric contractions", *Journal of Biomechanics*, vol. 30, nº 2, pp. 163-176, 1997.
- [17] G. Ayoub, F. Zaïri, M. Naït-Abdelaziz y J. M. Gloaguen, "Modelling large deformation behaviour under loading–unloading of semicrystalline polymers: application to a high density polyethylene", *International Journal of Plasticity*, vol. 26, nº 3, pp. 329-347, 2010.
- [18] F. J. Gil, M. P. Ginebra y J. A. Planell, "Metales y aleaciones para la substitución de tejidos duros", *Biomecánica*, vol. VII, nº 13, pp. 73-78, 1999.

CÁLCULO DE FUERZA PARA AGARRE ÓPTIMO DE UN EFECTOR FINAL DE TRES DEDOS UTILIZANDO EL ALGORITMO DE FORRAJEО DE BACTERIAS

Optimal-grip force calculation for a three-fingered end effector using the bacterial foraging algorithm

RESUMEN

El algoritmo de forrajeo de bacterias (BFOA) se basa en el comportamiento de una colonia de bacterias que busca la concentración óptima de nutrientes y es una de las estrategias de optimización de mayor actualidad. En este trabajo se presenta el cálculo de la fuerza mínima para el agarre óptimo en un efector final de tres dedos, utilizando sus puntos de contacto como variables de diseño para resolver el problema de optimización asociado, el cual está planteado como mono-objetivo. Para la solución se utiliza una aplicación novedosa basada en un algoritmo BFOA, modificado para el manejo de restricciones. Los resultados de la simulación son altamente competitivos respecto a los obtenidos en trabajos similares, en los que el planteamiento ha sido multiobjetivo, y demuestran que este tipo de algoritmos metaheurísticos puede aplicarse eficientemente a la solución de problemas reales de ingeniería.

Palabras clave: algoritmo de forrajeo de bacterias modificado, efector final de tres dedos, optimización, restricciones.

ABSTRACT

The bacterial foraging algorithm (BFOA) is based on the behavior of a colony of bacteria when looking for an optimal concentration of nutrients, and nowadays is one of the most revisited optimization strategies in literature. In this paper the calculation of the minimum strength for optimal grip on a three-fingered end effector is presented, using its contact points as design variables to solve the related optimization problem, which is designed as a single-objective case. To solve it, a new application based on a modified algorithm BFOA for constraint handling is used. The simulation results are highly competitive with respect to those obtained in similar developments with multi-objective approaches, showing that these meta-heuristic algorithms can be used efficiently in order to solve real-world engineering problems.

Keywords: constraint, modified bacterial foraging algorithm, optimization, three-fingered end effector.

ÉDGAR ALFREDO PORTILLA-FLORES

Ingeniería eléctrica, Ph. D.
Profesor investigador
Instituto Politécnico Nacional
aportilla@ipn.mx

ÉRIC SANTIAGO-VALENTÍN

Ingeniero en sistemas
Alumno M. Sc.
Instituto Politécnico Nacional
e.santiago.valentin@gmail.com

ADRIÁN SOLANO PALMA

Ingeniería en comunicaciones y electrónica
Alumno M. Sc.
Instituto Politécnico Nacional
asolanop@ipn.mx

EDUARDO VEGA-ALVARADO

Sistemas digitales M.Sc.
Profesor investigador
Instituto Politécnico Nacional
evega@ipn.mx

MARIA BÁRBARA CALVA-YÁÑEZ

Ingeniería eléctrica, M.Sc.
Instituto Politécnico Nacional
b_calva@hotmail.com

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el diseño de los robots industriales está enfocado a la generación de máquinas capaces de realizar cualquier tarea repetitiva en una línea de producción; con este fin, los robots se equipan comúnmente con un efector final ubicado en alguno de sus extremos, el cual les permite realizar diferentes tareas [1]. Los tipos más comunes de efectores finales son de herramienta y de pinza (*grasper*); los efectores de herramienta se utilizan en diversos procesos industriales, ya que permiten realizar operaciones tales como soldadura, barrenado, aerosol de plasmas, rectificado y desbaste, entre otras. Por su parte, los de tipo pinza son capaces de sujetar piezas de diferentes formas y tamaños, y buscan imitar el funcionamiento y desempeño de la mano humana. Las pinzas se pueden clasificar, según el tipo de impulsión

empleado, en hidráulicas, eléctricas, neumáticas y mecánicas [2].

Existen diferentes tipos de robots para la manipulación de objetos, tales como el dispositivo paralelo de configuración tipo delta [3], aunque las máquinas con efector tipo pinza son más populares. En este sentido, Prada et al. desarrollaron un efector final de tres dedos para agarre óptimo, utilizando el algoritmo de NSGA II con un problema multi-objetivo [4].

El algoritmo MBFOA es una herramienta de optimización de gran utilidad, ya que integra el manejo de restricciones; otra ventaja es su eficiencia para resolver problemas reales de ingeniería, como se demuestra en el trabajo de Hernández-Ocaña, en el que se implementó para un mecanismo de cuatro barras [5] y en

[6] se demuestra la eficiencia del algoritmo con problemas de *benchmark*.

En [7] se aplica MBFOA para la optimización de un regulador de voltaje de corriente directa (DC), en el que sus resultados permitieron eliminar de manera estable las perturbaciones en el cambio de voltaje.

En el presente trabajo se utiliza el algoritmo de forrajeo de bacterias modificado (MBFOA), para el cálculo de la fuerza mínima en el agarre de un objeto; se plantea la síntesis del mecanismo como un problema mono-objetivo cuyo vector de variables de diseño está formado por los puntos de contacto entre el objeto y el efector; este problema se retomó de la investigación de [4], en la que se realizó el planteamiento como un problema de optimización multi-objetivo.

1.1. Cinemática del efector

En la figura 1 se muestra el diagrama de uno de los dedos con los sistemas de coordenadas correspondientes a cada una de sus articulaciones [8-10]:

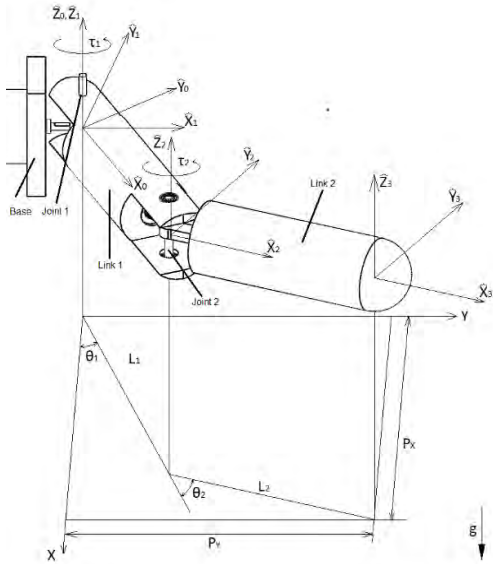


Figura 1. Sistemas coordenados para la cinemática del efector [4].

El análisis del efector final de tres dedos se presenta en detalle en [4], y en este trabajo se incluye un resumen del mismo. Para un dedo de 0 grados de libertad Rotacional-Rotacional, se calcula su matriz de transformación homogénea 0_3T , que relaciona el sistema coordenado O0 con O3 mediante el producto de las matrices 0_1T , 1_2T , 2_3T , y se muestra en (1):

$${}^0_3T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T$$

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} {}^0_3R & {}^0_3P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$${}^0_3R = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0_3P = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2)L_2 + \cos(\theta_1)L_1 \\ \sin(\theta_1 + \theta_2)L_2 + \sin(\theta_1)L_1 \\ d_2 \end{bmatrix}$$

A partir de la matriz de transformación se obtienen la matriz de orientación ${}^0_3R(\theta)_{3 \times 3}$ y el vector de traslación ${}^0_3P(\theta)_{3 \times 1}$ del punto final del dedo respecto a su base.

1.2. Espacio de trabajo

Una vez especificado el vector de traslación se determina el espacio de trabajo, que corresponde al área física que cubre el punto final de cada dedo, calculado a partir de su cinemática en forma recursiva, con (2) y (3).

$$Px = \cos(\theta_1 + \theta_2)L_2 + \cos(\theta_1)L_1 \quad (2)$$

$$Py = \sin(\theta_1 + \theta_2)L_2 + \sin(\theta_1)L_1 \quad (3)$$

1.3. Estabilidad dinámica de agarre

La estabilidad dinámica permite calcular las fuerzas necesarias para la sujeción sin movimientos de rotación o traslación ni deslizamientos, a partir de la posición y orientación de cada dedo. Para ello se agregan los sistemas de coordenadas P, S1, S2, S3 [11], como se muestra en la figura 2. El punto P hace referencia al origen de todos los sistemas coordenados, y se localiza en la base del efector, mientras que S1, S2, y S3 corresponden al origen de cada dedo, respectivamente. C1, C2, y C3 son la referencia al punto final de cada dedo, en tanto que O es el sistema de coordenadas del objeto to sujetar.

La teoría Screw and Wrench describe el cálculo de pares de vectores, tales como las fuerzas y los momentos que se presentan en la cinemática y la dinámica de los cuerpos rígidos [11], [12]; así, el desplazamiento espacial puede definirse por una rotación alrededor de una línea y una traslación a lo largo de la misma.

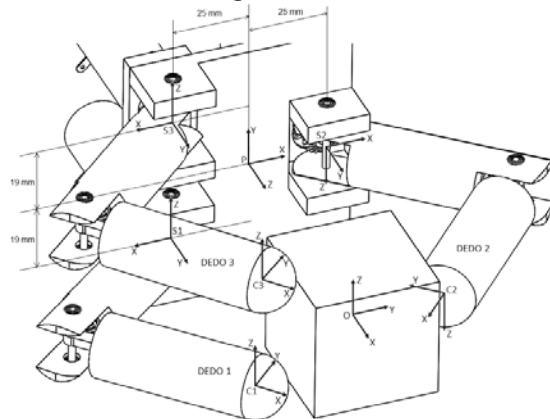


Figura 2. Sistemas de coordenadas adicionales para análisis del efector [4].

Los vectores de fuerza y par de torsión correspondientes se pueden manejar con esta teoría. Una fuerza tiene un punto de aplicación y una línea de acción; un par de torsión, por el contrario, es un momento puro que no está unido a una línea en el espacio, tal como un tornillo de paso infinito. La relación de estas dos magnitudes define el paso del tornillo [12]. En el caso del efector se debe determinar en primer término su matriz de orientación ${}^P_{c_i}R$ y la ubicación del punto final ${}^P_{c_i}p$ de cada dedo respecto al sistema coordenado P , usando (1); a partir de esta ubicación se calcula la posición de contacto del dedo respecto al sistema coordenado O .

La matriz $Ad_{g_{oc_i}}^T$ es la matriz de transformación que relaciona los puntos de contacto de los dedos con el objeto, como se muestra en (4).

$$Ad_{g_{oc_i}}^T = \begin{bmatrix} {}^O_{c_i}R & 0 \\ {}^O_{c_i}p & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

La operación de ${}^O_{c_i}p$ para los tres dedos se muestra en (5), (6) y (7):

$${}^O_{c_1}p = [0 \quad -20] \quad (5)$$

$${}^O_{c_2}p = [0 \quad 20] \quad (6)$$

$${}^O_{c_3}p = [0 \quad -20] \quad (7)$$

A continuación se define el mapa de agarre $G_i \in R^{p \times m_i}$ mediante (8), el cual indica la posición y orientación que tiene cada dedo al entrar en contacto con el objeto.

$$G_i = Ad_{g_{oc_i}}^T B_{c_i} \quad (8)$$

A partir del mapa de agarre G_i se obtiene un mapa de agarre general G y para que este sea lineal con las fuerzas de contacto, G_i se multiplica por la matriz de contacto B_{c_i} , en el que i es cada dedo y C el punto de contacto. El mapa de agarre general se define mediante (9) [10]:

$$G = \begin{bmatrix} Ad_{g_{oc_1}}^T B_{c_1} & Ad_{g_{oc_2}}^T B_{c_2} & \dots & Ad_{g_{oc_i}}^T B_{c_i} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$\therefore i = 1, 2, \dots, n$

Por la morfología del dedo o sus grados de libertad, no es posible ejercer un torque sobre la superficie de contacto ni una fuerza a lo largo del eje z , de ahí que la matriz de contacto con fricción quede como en (10). Los vectores de fuerza sobre el objeto se muestran en la figura 3. La matriz B_{c_i} corresponde a la restricción física en el efector y se deriva de la morfología propia del efector final [11].

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \therefore B_{c_1} = B_{c_2} = B_{c_3} = B \quad (10)$$

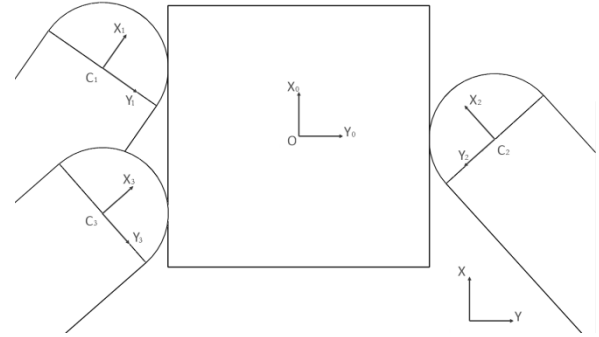


Figura 3. Agarre en un plano [4].

Partiendo de la matriz G se pueden calcular la fuerza y el torque a los que estará sometido el objeto, a partir de los valores de la fuerza generada por el contacto de los dedos o viceversa. Para determinar el efecto de las fuerzas de contacto en el objeto, se transforman las fuerzas para que correspondan al marco de coordenadas del mismo. Sea $({}^O_{c_i}p, {}^O_{c_i}R)$ la configuración de la estructura de contacto i en relación con el marco de objeto; entonces la fuerza ejercida por un único contacto se puede escribir en las coordenadas del objeto como se muestra en (11).

$$F_o = Ad_{g_{oc_i}}^T F_{c_i} = \begin{bmatrix} {}^O_{c_i}R & 0 \\ {}^O_{c_i}p & 1 \end{bmatrix} B_{c_i} F_{c_i} \quad (11)$$

Dado que se desea que la fuerza en (x, y) y el torque τ en z del sistema sean cero, se determinan los valores de fuerza requerida para cada dedo mediante (11), que para el caso del efector de este desarrollo quedarían como se muestra en (12).

$$\begin{bmatrix} F_{x_o} \\ F_{y_o} \\ \tau_{z_o} \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} F_{x_1} \\ F_{y_1} \\ F_{x_2} \\ F_{y_2} \\ F_{x_3} \\ F_{y_3} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Para resolver el sistema de ecuaciones derivado de (12) se requiere definir tres expresiones adicionales, considerando el peso del objeto mg y el producto del coeficiente de fricción μ con la fuerza perpendicular que ejerce cada dedo sobre la superficie del mismo. Lo anterior es para garantizar que no haya deslizamiento del objeto, y contrarrestar la fuerza ejercida por la gravedad; esto se presenta en (13).

$$mg + \mu \vec{F}_{x_1} + \mu \vec{F}_{x_2} + \mu \vec{F}_{x_3} = 0 \quad (13)$$

1.4 Problema de optimización

Se plantea minimizar la fuerza necesaria para que el efector de tres dedos sostenga un objeto; para ello se define como función objetivo la fuerza aplicada, la cual depende de los puntos de contacto entre el objeto y el

dedo, pues dichos puntos forman el vector de variables del problema. El minimizar la fuerza con la que se toma un objeto tiene como finalidad que este no se deforme. Además, se requiere evitar tanto el deslizamiento por la fuerza de gravedad como el desplazamiento espacial, ya que el objeto no debe rotar ni trasladarse en el eje z; para ello F_1 y F_3 deben ser opuestas a F_2 , lo que implica que la suma de F_1 y F_3 debe tener una magnitud igual a la de F_2 . Por esta razón, la función objetivo (FO) corresponde a la fuerza F_2 , y se aplica la restricción de igualdad de (15) adicionalmente a las planteadas en [4]:

$$\min F_2$$

$$\mathbf{F} \in \mathbf{R}^3 \quad (14)$$

Sujeto a:

$$h(x) = (F_1 + F_3 - F_2)^2 = 0 \quad (15)$$

2. ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN POR FORRAJE DE BACTERIAS MODIFICADO

El algoritmo de forrajeo de bacterias (BFOA) fue propuesto por Passino, simulando el comportamiento de una colonia de bacterias *E. coli*, e incluye sus movimientos, reproducción y la eliminación-dispersión, mientras buscan la concentración óptima de nutrientes [13]. El proceso de búsqueda de alimento que realizan las bacterias es el siguiente:

1. Inicialmente, las bacterias se distribuyen al azar sobre el mapa de nutrientes.
2. Las bacterias nadan buscando puntos de concentración de nutrientes; algunas de ellas se acercan a sustancias nocivas y se eliminan, y posteriormente ocurre la reproducción.
3. Las bacterias que han encontrado puntos de concentración se agrupan usando una comunicación de segregación de trayectoria.
4. Las bacterias se agrupan en el punto de mayor concentración de nutrientes; las bacterias permanecen en ese punto y la búsqueda de alimentos ha terminado para esa generación.
5. Comienza el siguiente ciclo, en el que las bacterias se dispersan nuevamente y buscan otras fuentes, con lo cual repiten el proceso anterior.

El algoritmo utilizado en este trabajo es una modificación del BFOA, propuesta por Hernández-Ocaña [5] para resolver problemas de optimización numérica con restricciones (MBFOA) y aplicado a mecanismos reales; las modificaciones llevadas a cabo respecto al algoritmo básico son [5]:

1. Se incluye en un solo ciclo el movimiento, la reproducción y la eliminación-dispersión.
2. Se consideran adecuaciones diferentes de tamaño de paso para cada parámetro de diseño.
3. Se implementa un mecanismo con base en las reglas de factibilidad de Deb, para manejo de restricciones.

```

Begin
  Inicialización de parámetros
  Generar una población inicial aleatoria  $\theta^i(j, G) \forall i, i = 1, S_b$ 
  Evaluar  $f(\theta^i(j, G)) \forall i, i = 1, S_b$ 
  For G=1 to GMAX Do
    For i=1 to  $S_b$  Do
      For j=1 to  $N_c$  Do
        Realizar el paso quimiotáctico (giro-nado o giro-giro) para la
        bacteria  $\theta^i(j, G)$ 
      End For
    End For
    Realizar el paso de reproducción para la eliminación de  $S_{re}$  (mitad)
    peores bacterias y duplicar la otra mitad, basado en las reglas de
    factibilidad.
    Eliminar a la peor bacteria  $\theta^w(j, G)$  de la población, basado en las
    reglas de factibilidad y generar una nueva aleatoriamente.
  End For
End

```

Algoritmo 1. Pseudocódigo del MBFOA [13].

En el algoritmo 1 se muestra el pseudocódigo del MBFOA; sus pasos se describen a continuación [6]:

1. Se inicializan los parámetros del algoritmo: número de bacterias S_b , límite del paso quimiotáctico N_c , número de bacterias por reproducir S_{re} , factor de escalamiento F , porcentaje de tamaño de paso R , y número de generaciones GMAX.
2. Se genera una población aleatoria cuyo tamaño permanece constante durante la ejecución.
3. Se evalúa cada una de las bacterias en la función objetivo.
4. En cada generación y para cada una de las bacterias se lleva a cabo N_c veces el proceso quimiotáctico y una reproducción, junto a la eliminación-dispersión de la población de bacterias. Las bacterias inician su búsqueda nadando y avanzando hacia una nueva posición (en caso de que la dirección de búsqueda aleatoria genere una mejor solución), o en su defecto giran para generar una nueva dirección de búsqueda (si el avance no fue favorable).
5. Se realiza el proceso de reproducción indicado por el parámetro S_{re} (usualmente la mejor mitad del total de las bacterias se queda y el resto se elimina), con base en las reglas de factibilidad de Deb.
6. Se realiza el proceso de eliminación-dispersión, para eliminar únicamente a la peor bacteria de la población, y se genera una nueva bacteria aleatoriamente para sustituirla.
7. Se repite el proceso a partir del paso 4, hasta cumplir con el número máximo de generaciones.

3. DETALLES DE LA IMPLEMENTACIÓN

La implementación del algoritmo se programó en Matlab R2012a. Las simulaciones se llevaron a cabo en una plataforma computacional con las siguientes características: procesador Intel Core i7 @ 2,2GHz, con 8 Gb de memoria RAM y sistema operativo Windows 8. En la simulación se aprecia la importancia del tamaño de paso (R) y del factor de escala (β), debido a que las

soluciones encontradas dependen de estos dos valores para que la función objetivo converja, asociados con los nudos o los giros. Para esta aplicación del MBFOA a la síntesis del efector de tres dedos, si $R < 0,1$ el vector de diseño entra en la zona factible pero la FO no converge, sin importar cuantos nudos y/o giros realice la bacteria. También es importante sintonizar el factor de escala, ya que en este caso si $\beta > 0,05$ la FO queda atrapada en mínimos locales, mientras que para $\beta < 0,01$ converge. En cuanto a nudos o giros (Nc) y al número de bacterias, si $Nc > 15$ y $Sb > 10$ la convergencia de la FO es lenta, lo que repercute en los tiempos de ejecución.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Después de algunas pruebas preliminares para sintonización, se ejecutó un conjunto de 50 simulaciones, de las cuales se seleccionaron los 10 mejores resultados, que correspondieron a las primeras 35 corridas. Los valores de los parámetros para el algoritmo MBFOA se establecieron de la siguiente manera: el tamaño de paso $R=1,7$, factor de escalamiento $\beta=0,0018$, nudos o giros $Nc=10$, población de bacterias $Sb=6$, número de bacterias por reproducir $S_{re}=3$ y número de generaciones $GMAX=6$.

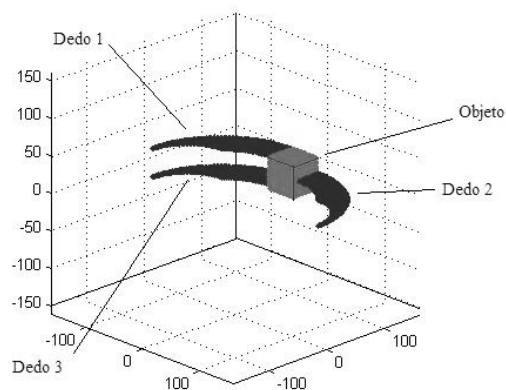


Figura 4. Posiciones del efector para la sujeción de un cubo.

En las tablas 1 y 2 se incluyen los resultados obtenidos; en los mismos se puede observar que el mejor valor se repite en 26 simulaciones, en las que sus valores finales son los mismos, incluyendo a la función objetivo, lo que muestra la eficiencia en el manejo de restricciones por la aplicación propuesta, complementada con un adecuado planteamiento del problema. En la tabla 3 se muestran algunos resultados estadísticos sobre el total de simulaciones; para un análisis más completo se calculó la desviación estándar. Los tiempos de ejecución para el mejor resultado están en el rango de 1,81 a 2,44 min; en la tabla 4 se muestran los tiempos correspondientes a las 10 mejores ejecuciones del algoritmo.

En la figura 5 se observa la convergencia de la FO para tres casos distintos derivados del conjunto de los 10 mejores resultados: mejor caso, caso promedio y peor caso, aunque todos ellos llegan al mismo valor final de la

FO ; se puede apreciar que en el mejor de los casos el algoritmo encontró la solución desde la segunda generación. En la figura 6 se muestra el número de bacterias que cumplen con las restricciones (zona factible); en el mejor de los casos, en la primera generación se obtiene que 5 de las 6 bacterias están dentro de la zona factible, debido a que el algoritmo realiza su proceso de eliminación-dispersión –que elimina la peor bacteria y genera una nueva aleatoriamente– con el fin de evitar los mínimos locales y tener una mejor exploración. Como se ve en esa figura, el comportamiento de los tres casos coincide en que la mayor parte de la segunda generación se encuentra dentro de la zona factible. En la figura 4 se muestra el efector con las posiciones óptimas de la mejor simulación de la tabla 1.

Frecuencia	Posición de dedo 1			Posición de dedo 2		
	x	y	z	x	y	z
26	-20	86	19	20	86	0
1	-20	91	19	20	91	0
4	-20	93	19	20	87	0
5	-20	87	19	20	93	0
1	-20	95	19	20	88	0
1	-20	88	19	20	95	0
3	-20	97	19	20	92	0
1	-20	92	19	20	97	0
1	-20	87	19	20	98	0
4	-20	98	19	20	87	0

Tabla 1. Mejores diez vectores de solución.

Frecuencia	Posición de dedo 3			Función objetivo (Fuerza)
	x	y	z	
26	-20	86	-19	22,8297 N m
1	-20	91	-19	24,2978 N m
4	-20	93	-19	24,4226 N m
5	-20	87	-19	24,4226 N m
1	-20	95	-19	25,0992 N m
1	-20	88	-19	25,0992 N m
3	-20	97	-19	25,9289 N m
1	-20	92	-19	25,9289 N m
1	-20	87	-19	26,4349 N m
4	-20	98	-19	26,4349 N m

Tabla 2. Mejores diez vectores de solución (continuación) y función objetivo correspondiente.

Mejor	22,8297
Promedio	25,0992
Peor	27,7567
Desviación estándar	1,50917

Tabla 3. Estadísticas de las simulaciones numéricas.

Simulación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tiempo(min)	1,81	2,44	2,04	2,21	2,13	1,89	2,08	2,18	2,21	2,31

Tabla 4. Tiempo de ejecución de las simulaciones.

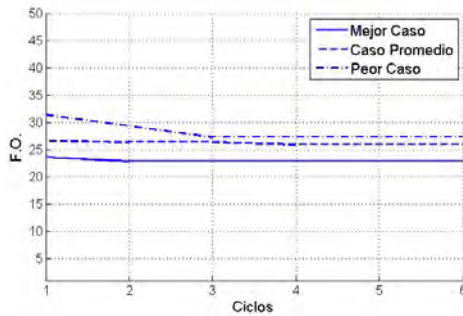


Figura 5. Convergencia de la función objetivo para los casos mejor, promedio y peor de las 10 mejores simulaciones.

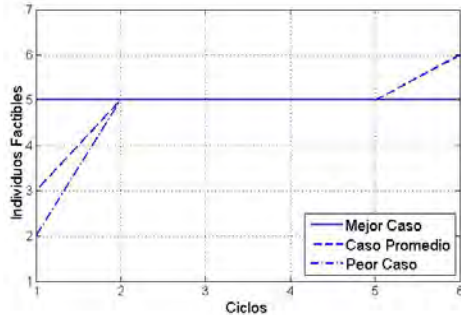


Figura 6. Comportamiento de la factibilidad de los individuos.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se propone una solución novedosa para la síntesis de un mecanismo efector de agarre con tres dedos, replanteando su desarrollo [4] como un problema de optimización numérica mono-objetivo, resuelto con el algoritmo MBFOA. Dadas las características del problema, el espacio de búsqueda es muy limitado, por lo que no se requiere una población abundante de bacterias ni un número grande de generaciones, e incluso el aumento de estos parámetros eleva el tiempo de ejecución sin una mejora notable del desempeño.

Los resultados obtenidos demuestran la eficiencia de esta implementación del algoritmo MBFOA para la solución de problemas reales de ingeniería, pues proporciona un buen desempeño en tiempos relativamente cortos sin requerir recursos de cómputo considerables. Con relación al análisis de los problemas por resolver, lo ideal es simplificar su planteamiento, de tal forma que se puedan expresar con el menor número posible de funciones objetivo, restricciones y variables de diseño, todo lo cual redundaría en una reducción de la complejidad en la solución propuesta.

Entre los factores clave para mejorar el rendimiento de esta aplicación está la sintonización de sus parámetros, específicamente el tamaño de paso y el escalamiento. Así, una de las líneas de trabajo futuro es el estudio del comportamiento del algoritmo respecto a la sintonización inicial de sus parámetros para proponer métodos de calibración adecuados; de igual forma puede considerarse

el control del comportamiento de los parámetros, para realizar el ajuste del tiempo de ejecución.

Agradecimientos

Todos los autores agradecen el apoyo del Instituto Politécnico Nacional de México, a través de su Secretaría de Investigación y Posgrado, vía el proyecto SIP-20141257. El segundo autor agradece al Conacyt de México por la beca para estudios de posgrado en el Cidetec-IPN.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. Guillén, J. F. Monterrosa, y A.O. Rodríguez, "Diseño de un efector final tipo pinza de 8 grados de libertad", Esime IPN, 22 de diciembre 2007.
- [2] C. Aguilar, O. R. Galván, y C. Nieto, "Diseño de un efector final tipo pinza autoconformable de 10 GDL", Tesina Esime IPN, 21 de noviembre de 2007.
- [3] E. Martínez, C. Peña, y E. Yime "Diseño óptimo de un robot paralelo con configuración delta para aplicaciones educativas", *Educación en ingeniería*, pp. 110-119, diciembre 2010.
- [4] V. Prada, O. Avilés, M. Mauleudoux, "Diseño de un efector final de tres dedos para agarre óptimo", *Dyna*, vol. 81, núm 184, pp. 93-101, abril 2014.
- [5] B. Hernández, "Diseño mecatrónico usando optimización basada en bacterias", tesis de Maestría, Lania Xalapa, Veracruz, México, octubre 2011.
- [6] E. Mezura, E. A. López, "Adaptation and local search in the modified bacterial foraging algorithm for constrained optimization", *WCCI 2012 IEEE World Congress on Computational Intelligence*, Brisbane, Australia, pp. 10-15, junio 2012.
- [7] B. Achiammal, R. Kayalvizhi, "Optimal tuning of PI controller using bacterial foraging algorithms for power electronic converter", *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)* ISSN: 2231-2307, Volume-3, Issue-5, Nov. 2013.
- [8] V. P. Jiménez, P. A. Niño, y O. F. A. Sánchez, "Control híbrido fuerza-posición para un manipulador de 2 GDL". Editorial Académica Española, 2013.
- [9] F. R. Cortés, *Robótica. Control de Robots Manipuladores*. Alfaomega, marzo 2011.
- [10] J. J. Craig, *Robótica*. Prentice Hall, 2006.
- [11] R. M. Murray, Z. Li, y S. S. Sastry, *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, CRC Press. 1994.
- [12] S. Stramigioli y H. Bruyninckx, "Geometry and Screw Theory for Robotics Stefano", *IEEE ICRA* 200. marzo 15, 2001
- [13] E. Mezura-Montes, O. Cetina-Domínguez Omar, y B. Hernández-Ocaña Betania, "Nuevas heurísticas inspiradas en la naturaleza para optimización numérica", Editores R. Silva Ortigaza, E.A. Portilla Flores, M. A. Molina Vilchis, *Mecatrónica*, Primera edición, México D. F., pp-263-271, 2010.

IMPLEMENTACIÓN DE FEM PARA LA MEJORA TECNOLÓGICA DEL DISEÑO DE FORJA EN CALIENTE EN HERRAGRO S. A.

FEM implementation toward hot forging process design improvement in Herragro S.A.

RESUMEN

Este trabajo presenta una metodología para la implementación de simulación, mediante FEM, en el diseño de proceso de forja en caliente. Se considera un análisis de los parámetros más influyentes en el diseño del proceso mediante la simulación; incluye la aplicación del modelo computacional, empleando Forge®, un *software* especializado de simulación de forja por elementos finitos, así como el procedimiento de ajuste del modelo por realización de pruebas físicas en una línea piloto del proceso. Finalmente, se propone una metodología para la implementación de la simulación FEM en el proceso de diseño y desarrollo de productos forjados, dado que el modelamiento es una herramienta estratégica en la definición de condiciones óptimas de operación.

Palabras clave: análisis por elementos finitos, forja en caliente, procesos de conformado, simulación de procesos.

ABSTRACT

This work presents a methodology to implement FEM simulation in the design process of hot forging. The most influential parameters in the design process were analyzed by simulation. It includes computational model application, using specialized finite elements Forge® software. Besides, the model was refined by performing physical tests on a pilot process line. Finally, a methodology for implementation of FEM simulation in design and development process of forged products was proposed, since modeling is a strategic tool in defining optimal operating conditions.

Keywords: *finite element analysis, hot forging, forming processes, process simulation.*

1. INTRODUCCIÓN

La forja es el proceso por el cual el material es deformado plásticamente en una o más operaciones mediante herramientas, con el fin de obtener un producto de una configuración compleja [1]. Este proceso permite obtener, a costos moderados [2], piezas con altas resistencias tanto mecánica, como al impacto y a la fatiga, para la producción de partes automotrices, equipos para minería y construcción, y para la producción de partes de la industria mecánica [1].

Tradicionalmente, el diseño de proceso de forja se ha realizado mediante el método de ensayo y error a partir de la geometría del producto final, a fin de determinar el número de etapas y la geometría de los herramientas. Inicialmente, el diseño geométrico de los dados omite ciertas variables, como la influencia de la rebaba en los esfuerzos sobre el herramental y las cargas requeridas de forja [3]. Debido a la incertidumbre sobre el flujo del material en los dados, el diseño del proceso incluye un costoso procedimiento iterativo de pruebas físicas y

corrección del herramental, hasta alcanzar la geometría de la pieza objetivo [4].

La incertidumbre que se tiene durante el diseño de cada etapa sobre el flujo del material, la carga de forja y los esfuerzos en los dados tiende a generar problemas de proceso durante las pruebas físicas, tales como pliegues, falta de llenado, rotura de dados, etc. La corrección de estos problemas promueve el exceso de material en el diseño final, que se retira en forma de rebaba. Lo anterior genera aumento de los tiempos de diseño y lanzamiento del producto, aumento de los costos de procesamiento y materia prima, que, en los procesos de forja, constituye hasta el 70% del costo total.

El método de elementos finitos (FEM) es una herramienta útil en el análisis de procesos de conformado [5], [6], que permite mejorar el diseño de proceso realizando las iteraciones de ajuste en simulaciones computacionales, en lugar de hacerlo sobre pruebas físicas [7]. Las simulaciones FEM pueden predecir el flujo del material y las cargas de forja a través de etapas consecutivas de conformado [8], evaluar el impacto de

MANUEL A. FLÓREZ R.

Ingeniero mecánico
Investigador
Herragro S.A.
maflorez@herragro.com

RAFAEL HENAO A.

Ingeniero mecánico, M.Sc.
Gerente técnico
Herragro S.A.
rhenao@herragro.com

FABIO M. PEÑA B.

Ingeniero mecánico, M.Sc.
Profesor Asociado
Universidad Autónoma de Manizales
fabiope@autonoma.edu.co

SARA A. RESTREPO V.

Ingeniera mecánica
Joven investigadora
Universidad Autónoma de Manizales
sara.restrepov@autonoma.edu.co

MANUEL VILLEGAS C.

Ingeniero mecánico
Auxiliar de investigación
Herragro S.A.
mvillegas@herragro.com

los cambios en la geometría inicial del material, anticipar los defectos del proceso, prever el desgaste y las fallas en los dados y evaluar diferentes alternativas de proceso [9]. Así, el análisis FEM se ha convertido en una herramienta esencial en el desarrollo de productos [10] y también en la optimización del diseño del proceso de forja, al reducir los tiempos de desarrollo y el desperdicio de material [11].

El presente trabajo considera la implementación de FEM para la mejora tecnológica del proceso de forja en la empresa Herragro S.A., mediante la incorporación del *software* especializado Forge® durante la etapa de diseño. Las condiciones particulares de procesamiento, los herramentales, los procedimientos, los equipos y los materiales utilizados en planta hacen necesaria una implementación gradual de la simulación en el diseño de proceso. Dado que todo proceso presenta una variabilidad en sus condiciones, debe realizarse un ajuste de parámetros clave, insumos o entradas de la simulación FEM, para predecir con una desviación aceptable las condiciones de cada etapa de conformado.

2. PROCESO DE FORJA EN HERRAGRO S. A.

La empresa Herragro S.A., dedicada a la fabricación y comercialización de herramientas para la agricultura, minería y construcción, utiliza varios tipos de forja en caliente: estampado, laminado, recalcado, entre otros. Las piezas son fabricadas de aceros de medio y alto carbono (AISI 1045, 1060) y algunos aleados (AISI 4140, 4340). En general el procesamiento de un producto incluye el calentamiento del acero a 1150 °C y puede conllevar varios procesos de forja para obtener la geometría final deseada de la pieza, uno de los requerimientos más importantes del diseño del producto. Después de retirar el exceso de material o rebaba, y usualmente sin recalentamiento, se realiza tratamiento térmico. Finalmente se efectúan procesos de terminado, tales como pulido, granallado, pintado o afilado.

2.1 Variables que influyen en el proceso

Con el objetivo de implementar la simulación por elementos finitos, es necesario conocer la fundamentación de los fenómenos que gobiernan el proceso de forja en caliente. Altan et al. [12] dividen en tres grupos principales las variables que deben ser consideradas en el proceso: propiedades del material, variables asociadas con los herramentales, y características de los equipos disponibles.

El modelo utilizado en el presente trabajo para el flujo del material en caliente fue el de Henssel-Spittel o Norton-Hoff, presentado en (1) [13].

$$\bar{\sigma} = K \cdot \bar{\epsilon}^n \cdot \dot{\bar{\epsilon}}^m \cdot e^{\beta/T} \quad (1)$$

donde $\bar{\sigma}$ es el esfuerzo de flujo, K el coeficiente de resistencia, n es el exponente de deformación-endurecimiento, m es la sensibilidad de tasa de deformación, y β es la sensibilidad a la temperatura [13].

Según el modelo, se identificaron las variables de proceso que afectan la deformación unitaria ($\bar{\epsilon}$), la tasa de deformación ($\dot{\bar{\epsilon}}$) y la temperatura (T). Las variables de proceso que determinan la deformación unitaria impuesta sobre el material son: la geometría del herramental y de la materia prima, la imposición de desplazamiento en la prensa o laminador, y la fricción existente entre el material y el herramental. Por otra parte, las variables de proceso que determinan la tasa de deformación son: la cinemática del equipo utilizado y las restricciones de flujo impuestas por la geometría del herramental. Finalmente, las variables de proceso que determinan la distribución de temperatura en la pieza son: la condición inicial de la pieza, el calentamiento por trabajo mecánico de deformación realizado sobre el material, la transferencia de calor por conducción hacia el herramental y por convección durante el tiempo de espera entre etapas. El modelamiento CAD de pieza y herramental, los fenómenos interactuantes de plasticidad, viscosidad, transferencia de calor por conducción y convección, y la presencia de fricción en múltiples etapas del proceso justifican la utilización del *software* especializado para acelerar el proceso de diseño.

3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE SIMULACIÓN DE UNA ETAPA DE CONFORMADO

La Figura 1 presenta la configuración requerida para la simulación de una sola etapa de conformado para un producto dado. De las variables de entrada mostradas en la figura, las siguientes corresponden a condiciones particulares del proceso, que deben ser obtenidas en planta:

- Modelos CAD tanto de la materia prima como de los dados propuestos para la etapa particular.
- Cinemática del equipo de procesamiento: debe disponerse de la información del desplazamiento del herramental y la función velocidad-desplazamiento impuesta por el equipo en la etapa considerada.
- Temperatura de la pieza y de los herramentales al inicio de la etapa. Generalmente se asume la distribución homogénea en las etapas iniciales.
- Tiempo entre etapas, durante el cual la pieza experimenta un enfriamiento por convección.
- Condiciones de lubricación: tipo de lubricante utilizado y condiciones de relubricación.

Una vez obtenida la información de entrada para la simulación, es necesario tomar algunas decisiones sobre la estrategia del modelamiento: tamaño de los elementos de malla, rigidez del herramental [14]. En las simulaciones de flujo de material, usualmente se omite la elasticidad de los dados y se obtiene la carga requerida de forja, independientemente de la capacidad real de la máquina.

Durante el procesamiento de la solución del modelo, las altas deformaciones plásticas resultantes de los fenómenos de plasticidad, viscosidad, transferencia de calor y fricción hacen necesario un proceso incremental de iteración-convergencia de múltiples subetapas de carga y el reenmallado periódico de la pieza [14].

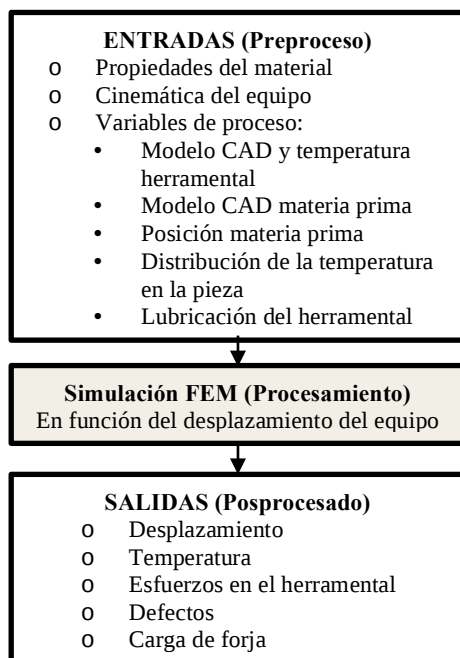


Figura 1. Configuración para la simulación de una etapa de conformado.

Durante el posprocesado de la etapa de forja, se pueden explorar variables en función del desplazamiento de la prensa, tales como desplazamientos, esfuerzos, deformaciones unitarias, tasas de deformaciones, esfuerzos de contacto, carga de forja o distribución de temperatura. Algunas de estas variables obtenidas a la salida de una etapa serán las entradas de la etapa siguiente, en términos de forma de la pieza, distribución de temperaturas e historia de deformación. La información más relevante para el proceso de diseño es la forma final de la pieza en la etapa, ya que indica la proximidad a la pieza objetivo y si el resultado refleja o no la intención de diseño.

Independientemente de la precisión del *software* de simulación, la variabilidad de los parámetros de entrada o su nivel de incertidumbre afectará los resultados que se obtienen en cada etapa; además, toda desviación de

dichos parámetros producirá una variación que se propagará aguas abajo en la simulación completa del proceso. Por lo tanto, para incorporar la simulación FEM en el proceso de diseño se hace necesario: 1) Identificar los parámetros de entrada que tienen mayor influencia en la geometría obtenida de la pieza en la simulación; y 2) Realizar el ajuste de dichos parámetros comparando los resultados de la simulación con las formas reales obtenidas en el proceso.

4. IDENTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS MÁS SENSIBLES PARA EL PROCESO DE HERRAGRO S.A. MEDIANTE SIMULACIÓN

Para la identificación de los parámetros sensibles se realizaron simulaciones de una etapa de forja en condiciones estándar de proceso. Luego, mediante múltiples modelamientos, se evaluó el impacto de la variación de algunos parámetros en la forma final obtenida de la pieza y en la carga requerida de forja.

Las simulaciones consideraron las dos piezas, una de geometría sencilla y la otra compleja, de la Figura 2, cuyos parámetros estándar de proceso se muestran en la Tabla 1. En las simulaciones que se describen a continuación no se contemplaron variaciones en la geometría y temperatura del herramental, ni en la geometría de la materia prima, y se asumió distribución uniforme de temperatura en la pieza.

Tabla 1. Parámetros estándar de proceso.

Parámetro	Pieza 1	Pieza 2
Geometría	Discoidal	Compleja
Lubricación	Agua + Grafito	Agua + Grafito
Temperatura	1200°C	1200°C
Material	AISI 1045	AISI 1045
Equipo	Prensa 1	Prensa 1

Las conclusiones obtenidas a partir de estas simulaciones son aplicables solo a las condiciones y rangos de variación de parámetros, particulares del proceso de Herragro S. A.

Las Figura 3-a y 3-b muestran que la forma final es prácticamente independiente de la temperatura de la pieza, mientras que la lubricación tiene un efecto significativo en las dimensiones obtenidas. Se determinó que la lubricación tiene mayor influencia en piezas de geometría compleja y en zonas de alta deformación, como la región de generación de rebaba (ver figura 3b, cota C); y que produce incrementos hasta del 55% en las dimensiones transversales a expensas de una disminución en las longitudinales. Además, en el proceso de producción en planta, la fricción también se ve afectada por el acabado superficial de los herramientas.

Las Figura 3-c y 3-d muestran que la variación en la forma es insignificante para los materiales utilizados en

la planta. Análisis similares muestran que la forma obtenida es prácticamente independiente del equipo utilizado, dado que las máquinas disponibles en Herragro S.A. son prensas mecánicas, que aunque tienen diferente

capacidad y cinemática, generan el desplazamiento en períodos de tiempo muy cortos ($\sim 1/10$ s).

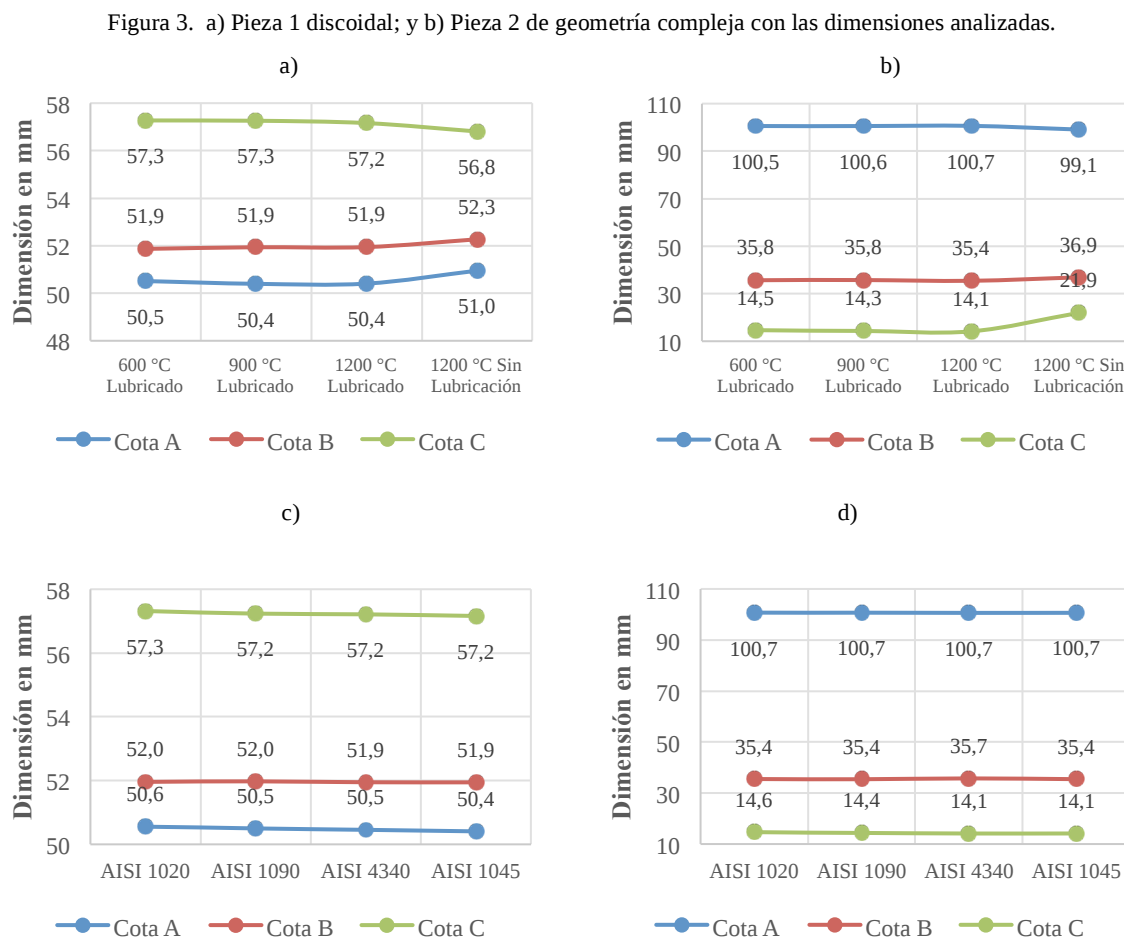
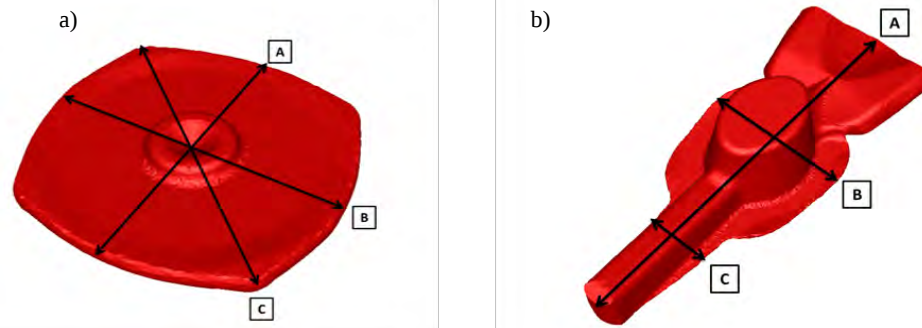


Figura 2. Influencia de parámetros sensibles en la geometría obtenida de la pieza: a) Temperatura y lubricación Pieza 1; b) Temperatura y lubricación Pieza 2; c) Material Pieza 1; d) Material Pieza 2.

Sin embargo, también se evidenció que aunque algunos parámetros no son relevantes desde el punto de vista de la forma obtenida, sí tienen una influencia importante en la carga requerida de forja. La Figura 4 muestra cómo influyen la complejidad, la temperatura de la pieza y la lubricación, sobre la carga requerida de forja, expresada en porcentaje de capacidad de la prensa.

Mediante las simulaciones también pudo establecerse que la carga de forja para piezas complejas puede presentar variaciones de $\pm 19\%$ para los materiales utilizados en la empresa y $\pm 16\%$ para piezas de geometría sencilla, mientras que la cinemática de los equipos de Herragro S.A. (prensa mecánica) produce variaciones de mucho menor impacto ($\pm 4\%$) en la carga requerida de forja.

5. AJUSTE DE LOS PARÁMETROS SENSIBLES MEDIANTE PRUEBAS FÍSICAS

Dado que en la fase inicial de diseño el objetivo primario es la obtención de la forma de la pieza, es necesario efectuar el ajuste de los parámetros sensibles del proceso. Esto se realiza mediante la comparación topológica y dimensional entre las piezas físicas obtenidas del proceso y el modelo CAD logrado usando la simulación, pero considerando la contracción volumétrica por el enfriamiento hasta la temperatura ambiente.

Mediante el análisis de las diferencias geométricas obtenidas puede realizarse el ajuste de los parámetros de entrada relevantes, hasta lograr una predicción de la forma de precisión dimensional de 10%, tolerada en la empresa para herramientas agrícolas.

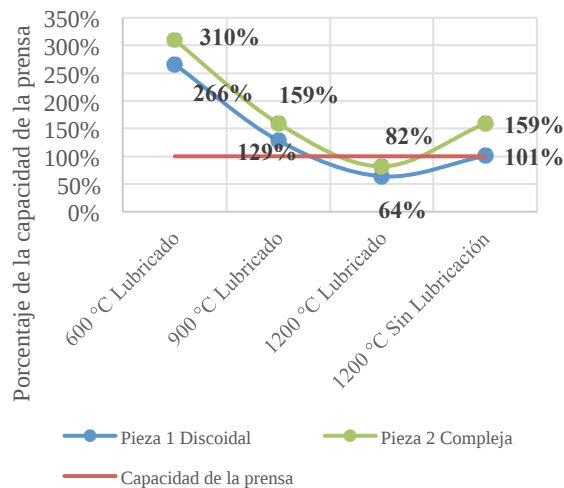


Figura 4. Influencia de complejidad, temperatura y lubricación en la carga requerida de forja.

En el proceso de implementación, una vez detectadas las diferencias geométricas, es necesario realizar la identificación de los parámetros de entrada que producen la desviación, tal como se muestra en la Figura 5. Como se expuso en la sección anterior, los parámetros considerados no relevantes para la obtención de la forma fueron: temperaturas de pieza y herramental, material, y equipo utilizado.

Adicionalmente, durante la realización de las pruebas físicas se estableció que los parámetros de entrada que producen mayor desviación de la forma obtenida son: la lubricación y, como es evidente, la precisión de los modelos CAD así como la distancia entre los dados al final de cada golpe, los cuales se describirán brevemente a continuación.

El modelo CAD de los dados puede diferir de la geometría real debido a los ajustes de las cavidades realizados en planta que no son controlados o reportados para ser retroalimentados en el diseño, así como al

desgaste natural de sus superficies después de un número determinado de piezas. Respecto a la materia prima, se detectaron diferencias significativas tanto en la geometría del estado de suministro, como en la densidad del material (un 2,34%), que generan a su vez variaciones apreciables en la forma obtenida mediante la simulación. La distancia entre los dados al final del golpe no es un parámetro fácil de determinar en planta, ya que se ve afectada tanto por el montaje del herramental como por la rigidez estructural del equipo.

Se requieren múltiples simulaciones, en las que se van corrigiendo paso a paso los parámetros mencionados hasta alcanzar concordancia con la geometría obtenida en el proceso.

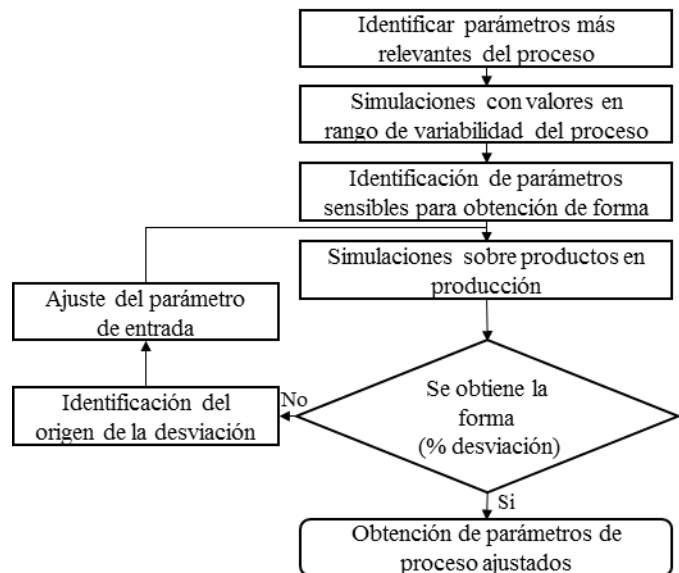


Figura 5. Esquema de trabajo para la implementación de FEM en el diseño de forja en caliente.

Como ejemplo, se presenta la comparación dimensional realizada en una pieza de AISI 1045 de geometría compleja, obtenida mediante estampado a 1200 °C. La Figura 6 presenta la desviación de las dimensiones principales respecto a la pieza obtenida en planta de producción. Como puede verse, una vez realizado el ajuste de parámetros, el 92% de las dimensiones generadas por la simulación presentan desviaciones menores del 10%.

Como ayuda para la identificación de las diferencias topológicas y dimensionales entre piezas físicas y los resultados de la simulación, se utilizó el escaneo 3D de una preforma física obtenida y se generó un modelo CAD que puede ser comparado directamente con la forma obtenida mediante la simulación en el modelador de sólidos.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se desarrolló un esquema de trabajo para la implementación de simulación FEM en el proceso de diseño de forja en caliente para Herragro S.A., que incluye las consideraciones anteriores y se muestra en la Figura 5.

Durante la fase de diseño, la lubricación se convierte en el parámetro de entrada de mayor influencia sobre el flujo obtenido de material, que determina la forma de la pieza al final de cada etapa. Otros parámetros, como el equipo utilizado, la temperatura de la pieza, etc., no tienen influencia significativa en la forma final pero sí en la carga requerida de forja y en los esfuerzos en los dados. Este hecho justifica que durante la fase inicial de la simulación de un proceso se asuma la rigidez infinita de los dados y la capacidad ilimitada de carga del equipo.

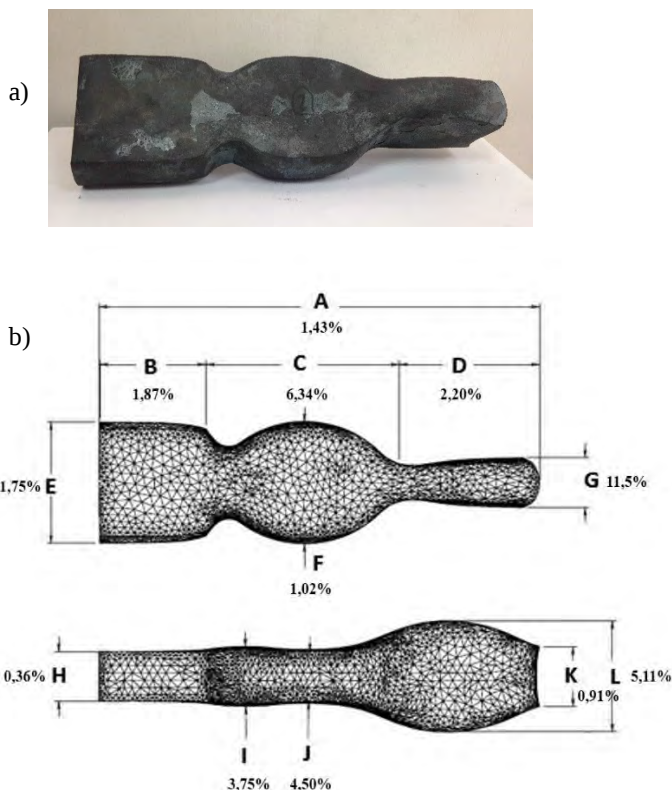


Figura 6. a) Pieza obtenida mediante el proceso; b) Vistas del CAD obtenido mediante simulación y sus valores porcentuales de desviación.

Sin embargo, una vez ajustado el herramental para obtener la forma final, se analiza la capacidad requerida del equipo y del herramental. Se realizan ajustes finales a fin de obtener valores factibles de carga y esfuerzos en el herramental.

Con la implementación de FEM, la empresa Herragro S. A. ha logrado simular más de veinte procesos de

fabricación de sus productos, con el objeto de identificar el origen de defectos, como falta de llenado y traslapes de material. La corrección de dichos defectos con ayuda de la simulación ha producido resultados satisfactorios.

La simulación también le ha permitido a Herragro S.A. realizar las iteraciones y ajustes de diseño, sobre el modelo CAD, de por lo menos cinco nuevos productos, antes de ser implementados en la planta, en lugar de realizar numerosas y costosas pruebas físicas, lo que ha generado ahorros en reajustes en herramientas, mano de obra y ocupación del equipo de producción.

Actualmente se está llevando a cabo un proyecto de optimización de la materia prima para un producto forjado en caliente, con el que se pretende reducir la generación de retal mediante el rediseño de los herramentales, para lograr una mejor localización de material desde las preformas del proceso, y generar una disminución de costos, dado que la materia prima representa el 70% del costo del producto final. Se han propuesto y simulado unas 15 estrategias de ahorro y se están poniendo a prueba dos propuestas en la línea de producción.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] T. Altan, G. Ngaile, y G. Shen, *Cold and Hot Forging Fundamentals and Applications*, Ohio, ASM International, 2004, pp. 7-9.
- [2] E. G. Nisbett, *Steel Forgings: design, production, selection, testing and application*, ASTM International, 2005, pp. 9-12.
- [3] B. Y. Juna, S. M. Kangb, M. C. Leec, R. H. Parkb, y M. S. Joun, "Prediction of geometric dimensions for cold forgings using the finite element method", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 189, n° 1-3, pp. 459-465, 2007.
- [4] G. D. Satish, N. K. Singh, y R. K. Ohdar, "Preform optimization of pad section of front axle beam using DEFORM", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 203, n° 1-3, pp. 102-106, 2008.
- [5] B. Lua, H. Oub, C. G. Armstronga, y A. Rennie, "3D die shape optimization for net-shape forging of aerofoil blades", *Material and Design*, vol. 30, n° 7, pp. 2490-2500, 2009.
- [6] M. y T. S. Sedighi, "A new approach to preform design in forging process of complex parts", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 197, pp. 314-324, 2008.
- [7] Y.-J. Zhang, W.-J. Hui, y H. Dong, "Hot forging simulation analysis and application of microalloyed steel crankshaft", *Journal of Iron and Steel Research, International*, vol. 14, n° 5, pp. 189-194, 2007.
- [8] H. Ryutaro, S. Akihiko, F. Yoshida, y V. Toropov, "A new algorithm for reduction of number of press-forming stages in forging processes using numerical optimization and FE simulation", *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 20, pp. 974-983, 2008.

- [9] A. D. Santos, J. Ferreira Duarte, A. Reis, B. d. Rocha, R. Neto, y R. Paiva, "The use of finite element simulation for optimization of metal forming and tool design", *Journal of Materials Processing Technology*, nº 119, pp. 152-157, 2001.
- [10] W. L. Chana, M. W. Fua, J. Lua, y C. L. C, "Simulation-enabled study of folding defect formation and avoidance in axisymmetrical flanged components", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, pp. 5077-5086, 2009.
- [11] H. Valberg, *Applied metal forming: Including FEM analysis*, Norwegian University of Science and Technology, 2010, pp. 4-7.
- [12] T. Altan, Op. cit., pp. 193-196.
- [13] H. Valberg, Op. cit., pp. 115-118.
- [14] M. García, "Hot forging simulation of an axisimetric model using the ANAND model and the rezoning process within ANSYS APDL Environment", de *Encuentro Andino de Usuarios ESSS-ANSYS*, 2011.

MANO ROBÓTICA TELEOPERADA

Teleoperated Robotic Hand

RESUMEN

En este artículo se realiza el estudio y el diseño del prototipo de una mano robótica teleoperada, gracias al diseño de sistema de adquisición y procesamiento de los movimientos de los dedos índice, medio y pulgar mediante un guante de datos, el cual implementamos para generar en tiempo real los movimientos de nuestro modelo.

Palabras clave: acelerómetro, anatomía, guante de datos, mano teleoperada

ABSTRACT

This paper describes the study and design of a teleoperated robotic prototype hand, built thanks to a design acquisition and processing system of the movements of index, middle and thumb fingers through a data glove, which was implemented in our work to generate real-time movements of our model.

Keywords: accelerometer, anatomy, data glove, teleoperated hand.

OSMAN PARRA HUERTAS

Estudiante Ingeniería Electrónica
Estudiante
Universidad Central
oparrah@ucentral.edu.co

JOSÉ WILSON YARA

Estudiante Ingeniería Electrónica
Estudiante
Universidad Central
jyarav@ucentral.edu.co

ÓSCAR FERNANDO AVILÉS

Ing. electrónico, Ph.D.
Profesor
Universidad Central
oaviless@ucentral.edu.co

RÓBINSON JIMÉNEZ MORENO

Ing. electrónico, M.Sc.
Profesor
Universidad Autónoma de Colombia.
jimenez.robinson@fuac.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El éxito del que ha gozado el hombre en su evolución se debe a la increíble pericia que tiene para explorar y estudiar el mundo en que habita, y responde, en gran parte, a la capacidad de manipulación del ser humano. Efectivamente, con las manos se pueden agarrar, sostener y manejar objetos con gran pericia, y no hace falta decir que es una herramienta vital en el desempeño de las tareas cotidianas.

El objetivo que se planteó el grupo de trabajo al diseñar y fabricar el prototipo descrito en este artículo (mano robótica teleoperada) es el de construir los cinco dedos de la mano, de forma que su funcionamiento sea similar al del obtenido mediante un guante de datos

2. TRABAJOS RELACIONADOS

En esta sección se enuncian los diferentes adelantos y tecnologías que se han desarrollado para el diseño y construcción de manos robóticas y se describe sucintamente cuál ha sido su evolución en el tiempo. El estudio de estos avances nos guio en la reproducción de los movimientos y las habilidades que posee la mano

humana, reproducción que ha constituido el objetivo de muchas organizaciones, universidades y compañías en todo el mundo. En la tabla 1 se presentan algunos de los trabajos realizados acerca de manos robóticas.

Tabla 1. Revisión manos robóticas [2].

Nombre	Autor	Año	Número de dedos	GDL
LMS	(Gazeau)	2001	4	16
Karsruhe	(Shulz)	2001	5	17
DLR II	(Butterfass)	2001	4	13
Gifu	(Kawasaki)	2001	5	16
Ottobock	(Otto Book)	2002	3	1
RTF Hand	(Masa)	2002	3	6
Shadow	(Shadow)	2002	5	24
Spring Hand	(Carroza)	2004	3	8
UMNG	(Ocampo)	2004	4	12+2

El estudio de la mano humana ha servido de inspiración para el diseño de manos robóticas y ha conducido a la construcción de innovadores pero costosos prototipos de dedos, que luego se implementan en la mano robótica para que trabajen como partes funcionales de robots antropomórficos. Algunos de los trabajos realizados son las manos de Stanford/JPL Hand [3], que presenta 9 grados de libertad con dos dedos y un pulgar oponente; esta mano es controlada por 12 servomotores DC y sus articulaciones son impulsadas por cables. En cuanto a la

Utah/MIT Hand [4], fue desarrollada por el grupo de investigación en agarre y manipulación de dedos, y tiene 4 grados de libertad en cada uno de sus cuatro dedos, incluyendo el pulgar. Los 16 GDL se accionan mediante un enfoque de tendones operado por un sistema de 32 tendones poliméricos independientes y actuadores neumáticos. Otras manos robóticas son la Spring Hand [5], la DLR Hand [6], la UNT Hand [7] y la UMNG Hand [8].

Estos son algunos de los trabajos ejecutados pero no son los únicos, pues están, por ejemplo, el de M. Cecarelli et al. [9], desarrollado mediante secuencias de grabaciones de video y fotos fijas, con el fin de encontrar la cinemática de cada uno de los dedos de la mano; también encontramos un sistema de actuación que emula el sistema muscular del dedo, de F. García et al. [10]; igualmente interesante es el diseño y prototipo de un dedo con dos grados de libertad y peso muy bajo, que utiliza eslabones rígidos unidos con elementos flexibles y actuadores de desplazamiento lineal, de Fabrizio Lotti [11].

3. GUANTE DE DATOS

Uno de los medios comunes de teleoperación háptica es el de comando mediante guantes hápticos, que se ha venido desarrollando para diferentes aplicaciones de entretenimiento y entornos virtuales [12] y se emplea como medios de control de robots o manos robóticas [13], [14], [15]. En [16] se presenta la implementación e integración de un guante háptico a una silla de ruedas, lo cual permite a la persona discapacitada reemplazar un *joystick* de mando por el guante.

Una de las aplicaciones más relevantes en implementaciones hápticas es la telecirugía, que une el campo de la medicina con el del control artificial y permite al cirujano realizar procesos quirúrgicos desde lugares remotos. Las desventajas principales de esta aplicación son la reducción de visión del cirujano y la pérdida de la realimentación de las manos a través de la vista [17].

El desarrollo de guantes como dispositivos hápticos forma parte de las investigaciones que se están realizando hoy en día, con miras a controlar manipuladores u otros dispositivos mediante el sensado de movimientos, fuerzas, etc., con el fin de tener control sobre un sistema.

Los guantes de datos reconocen por medio de sensores los diferentes tipos de reacciones –movimientos, temperaturas, entre otras–, que luego son procesados y que, en nuestro prototipo, permitirán replicar de la manera más real posible el movimiento de cada uno de los dedos utilizando una interfaz y un *software* para su manejo.

Se han desarrollado distintos modelos de guantes de datos, en búsqueda de detectar cada una de las variables y de los GDL de la mano. Precisamente uno de estos modelos es el AcceleGlove [18], que usa sensores de tipo acelerómetro y permite detectar el movimiento en tres dimensiones respecto a un punto cero o punto de gravedad; esto hace muy fácil trabajar sus datos, que vienen en grados y facilitan su calibración.

En el mercado existen diferentes modelos y prototipos de guantes desarrollados para realizar tareas complejas, como el manejo de robots manipuladores de materiales radiactivos, o simplemente como elementos de diversión, por ejemplo los usados en la música. Sound Catcher [19] es un ejemplo claro de ello: su funcionamiento se inicia cuando se abre la mano que contiene el guante; este activa unos sonidos de percusión que van coordinados con la voz del cantante y que mejoran el entorno sonoro donde se encuentra el público. Este guante, que usa acelerómetros de gran precisión, fue presentado durante el TEDGlobal 2012, en Edimburgo, y tuvo gran acogida.

En nuestro prototipo se implementó el guante de datos generado por L. J. Acuña, S. D. Zapata y O. F. Avilés [20], que responde al diseño de un sistema capaz de adquirir, ordenar, enviar, procesar y visualizar la información obtenida de un dispositivo compuesto por acelerómetros ubicados en la mano, con los cuales replicaremos los movimientos en cada uno de los dedos de nuestra mano robótica teleoperada.

4. DISEÑO ANTROPOMÓRFICO DE LA MANO ROBÓTICA TELEOPERADA

Para lograr un diseño que exprese de forma lo más real posible los movimientos de cada uno de los dedos de la mano, es necesario conocerlos en su forma originaria. Para ello, tomando como punto de referencia la palma; realizaremos entonces un repaso muy sencillo de cada una de las articulaciones y huesos.

La mano es un apéndice complejo, compuesto, en su estructura ósea, por 27 huesos contados entre el final de la muñeca y las puntas de los dedos (incluyendo todas las falanges) [21]. La mano humana posee 21 grados de libertad. Los dedos tienen tres falanges y cuatro grados de libertad; dos de ellos en su articulación con la palma (llamada metacarpo-falangeal, ya que articula la falange proximal con el hueso metacarpiano), y los otros dos provenientes del movimiento entre la falange media y distal. Además, hay cinco grados de libertad para el pulgar, que tiene dos falanges y un metacarpo [22].

La mano humana deriva su agilidad de tres características esenciales:

Pronación y supinación: son los movimientos del antebrazo que tienen por efecto hacer que la mano

ejecute una rotación de fuera hacia dentro, y el que hace que la mano vuelva la palma hacia arriba y el pulgar hacia fuera respectivamente.

Flexión y cierre de los dedos: es una función muy importante, y gracias a ella es posible realizar una gran variedad de tareas.

Oposición del dedo pulgar: situado al frente de la palma y los otros dedos, el pulgar puede usarse para el agarre multidedos, particularmente con el índice [23].

4.1 Consideraciones técnicas para el diseño

El diseño completo consta de tres elementos principales: los sensores, la unidad de procesamiento y el prototipo del modelo.

Sensores: Para captar cada una de las señales de movimiento de los dedos de la mano se utilizan sensores. Son muchos los tipos de sensores que existen en la actualidad, pero para nuestro diseño debemos medir un cambio de aceleración sobre un eje en un momento dado bajo la influencia de la gravedad, por lo cual usaremos, obviamente, acelerómetros, que se han popularizado gracias a su facilidad de manejo y bajo costo.

Emplearemos el acelerómetro MMA7361L, fabricado por Freescale Semiconductor, y que usa tecnología MEMS y funciona con configuración capacitiva; además detecta variaciones en las tres coordenadas. Para su ensamble en el guante de datos es necesario adquirir la tarjeta MMA736 [24] desarrollada por Sigma Electrónica, que reduce los tiempos por estar implementada en un PCB.



Figura 1. Tarjeta MMA736 fabricada por Sigma Electrónica.

Dichos PCB son instalados en cada uno de los dedos de interés del guante de datos, los cuales, gracias a que su referencia está ubicada en la parte contraria a la palma de

la mano, nos brindan como resultado las variaciones que necesitamos. Esos circuitos integrados son alimentados con un voltaje regulado de 3,3 VDC, obtenidos de un integrado LM1117 [25].

Unidad de procesamiento: Las señales obtenidas mediante el guante de datos son voltajes que varían según los movimientos que se realizan, y son enviados al circuito integrado encargado de realizar la conversión ADC, el cual toma las decisiones que previamente se han programado. El encargado de esta función es el PIC 18F452 de gama alta, que tiene importantes características como:

- Manejo de velocidades altas, cercanas a los 10MIP.
- 8 módulos de conversión ADC.
- Dos módulos PWM.
- Módulos de comunicación.

Cada una de las señales adquiridas por la unidad de procesamiento es analizada y retroalimentada con cada una de las señales adquiridas en el prototipo. Para lograr un uso adecuado y velocidad de trabajo se usa un cristal de 10MHz. Cada una de las entradas y salidas es debidamente procesada y verificada con el código de programación diseñado en MPLAB, basado en sistemas embebidos que permiten el control del prototipo.

Prototipo final: El prototipo se montó sobre una base que sostiene la mano teledirigida y en la cual se instaló cada uno de los componentes, incluyendo el circuito impreso, los sensores y actuadores, que son controlados por la unidad de procesamiento.

Para la implementación del prototipo se instalaron cinco motorreductores controlados por voltajes entre 5 y 12VDC; estos actuadores entregan 200 rpm y son bastante conocidos en sistemas robóticos, ya que su respuesta es muy buena y además son económicos.

Además, el sistema es retroalimentado gracias a unos sensores de tipo resistivo, que tienen como finalidad conocer las posiciones en que se encuentra cada uno de los dedos de la mano teleoperada.

4.2 Desarrollo del prototipo

Nuestro prototipo funciona según la secuencia mostrada en la figura 2. Empezamos por la toma de datos a partir del guante de datos, que, gracias a los acelerómetros y su respectiva tarjeta de adquisición, nos permite captar los valores de las variables importantes para nuestro proceso, por ejemplo el ángulo de cada movimiento.

Figura 2. Etapas de desarrollo de la mano robótica teleoperada.

Para las primeras etapas de análisis de los diversos movimientos, usamos el guante de datos que se muestra

en la figura 3. Los datos obtenidos se usarán luego para replicar cada uno de los movimientos de los dedos de la mano.



Figura 3. Guante de datos de 5 dedos con acelerómetros.

Para la siguiente etapa del proyecto se genera una mano mecánica, que se compone de falanges unidas por eslabones y que, en conjunto, forman los dedos de la mano. Ya que los movimientos que se realizan van a ser replicados en nuestro modelo, se debe controlar el desplazamiento de cada uno de los motores que los mueven, como se muestra en la figura 4.



Figura 4. Prototipo de mano robótica teleoperada.

En la figura 5 se muestra el resultado que debe obtenerse al fabricar una mano robótica teleoperada, que pueda ser utilizada en un futuro para el manejo de materiales peligrosos o trabajos riesgosos.

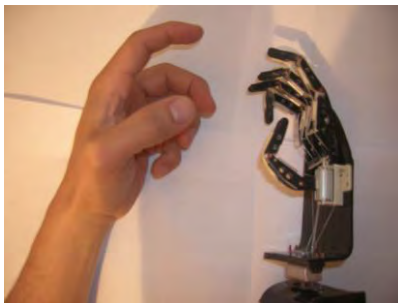


Figura 5. Mano robótica y mano humana.

Después de las etapas de captura y calibración que se realizaron para seguir los movimientos de la mano humana, se lleva a cabo el procesamiento de señales y se implementa una PCB que ejecutará las funciones que

debe realizar cada uno de los motores que controlan el desplazamiento de los dedos robóticos, gracias a los datos obtenidos por el guante de datos. En las figuras 6 y 7 se muestran las posiciones que se emplearon con el guante de datos y las posiciones finales de nuestro prototipo terminado.



Figura 6. Posición final en forma de garra.



Figura 7. Posición con los dedos levemente inclinados.

5. CONCLUSIONES

Se implementó un guante de datos funcional, en el que se realizaron caracterizaciones de los sensores escogidos, de tal manera que pudiesen medir correctamente cada uno de los movimientos estipulados. Asimismo, se diseñó y construyó una mano teleoperada, que satisface los grados de libertad necesarios para la utilización del guante.

Los resultados muestran que el desempeño del sistema es efectivo en conjunto, pues cumple el objetivo de tener un sistema activo que funcione bajo los parámetros estipulados, y se aprecia que aumenta la efectividad al aplicar realimentación con cada uno de los sensores en el guante de datos.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. J. Acuña y S. D. Zapata, "Diseño de un sistema de adquisición y procesamiento de los movimientos de los dedos índices, medio y pulgar mediante guante de datos", Tesis de grado, Universidad Central, Bogotá, 2013.
- [2] O. F. Avilés, y P. León, "Diseño y construcción de un dedo para *grippers* robóticos", Tesis de maestría, Universidad Tecnológica de Pereira, 2004.
- [3] M. T. Mason, y J. K. Salisbury Jr., *Robot hands and the mechanics of manipulation*. The MIT Press Series in Artificial Intelligence, 1985.
- [4] S. C. Jacobsen, J. E. Wood, D. F. Knutti, y K. B. Biggers. "The UTAH/MIT dextrous hand: Work in progress". *Robot, Grippers*, Springer-Verlag, Berlin, 1986.
- [5] M. C. Carrozza, C. Suppo, F. Sebastiani, B. Massa, F. Vecchi, R. Lazzarini, M. R. Cutkosky, y P. Dario, "The Spring hand: development of a self-adaptive prosthesis for restoring natural grasping", *Autonomous Robots*, 2004, vol. 16, n°. 2, Disponible en: <http://www.springerlink.com/content/m3023725t7518203/>
- [6] J. Butterfass, G. Hirzinger, S. Knoch, y H. Liu, "DLR's multisensory articulated hand", en *Proc. of the 1998 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Leuven, Bélgica, 1988.
- [7] O. F. Avilés, P. León, y T. G. Calle, "Dedos para grippers robóticos, Revisión bibliográfica", *Scientia et Technica*, vol. 11, n°. 27, 2005, pp. 97-103.
- [8] G. A. Ocampo y J. Rondón, "Diseño y construcción de una mano robot de cuatro dedos que imite los modelos prensiles humanos", Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, 2004.
- [9] M. Ceccarelli, N. E. Nava, y G. Carbone, "Optimal design of driving mechanism in a1-D.O.F. anthropomorphic finger", *Mechanisms and Machine Theory*, vol. 41, n°. 8, 2006, pp. 897-911.
- [10] F. García, J. Martínez, R. J. Saltarén, A. Guerrero, y J. López, "Diseño mecatrónico de un dedo antropomórfico", Universidad Politécnica de Cartagena / Murcia, España. Disponible en: http://www.ceafac.es/actividades/jornadas/XXII/documentos/H_05_R.pdf, 2011.
- [11] F. Lotti, y G. Basura, "A novel approach to mechanical design of articulated fingers for robotic hands", Disponible en: http://www.diem.inibo.it/personale/lotti/Articoli_UBhandIII%5Ciros_02.pdf, 2011.
- [12] G. C. Burdea, *Welcome to Virtual Reality*, CAIP Center, Rutgers University, 2008
- [13] R. Ozawa, y N. Ueda, "Supervisory control of a multi-fingered robotic hand system with data glove", *International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007*, IEEE/RSJ, pp. 1606-1611.
- [14] A. M. M. Ali, R. Ambar, M. M. A. Jamil, A. J. M. Wahi, y S. Salim, "Artificial hand gripper controlled via Smart Glove for rehabilitation process", *International Conference on Biomedical Engineering (ICoBE), 2012*, pp. 300-304.
- [15] Y. Lee, y D. Ryu "Wearable haptic glove using micro-hydraulic system for control of construction robot system with VR environment", *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, Seoul, Korea, 2008.
- [16] R. Akmeliawati, F. S. B. Tis, y U. J. Wani, "Design and development of a hand-glove controlled wheel chair" *4th International Conference on Mechatronics (ICOM)*, 2011, pp. 1-5, IEEE, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [17] J. M. Azorín, J. M. Sabater, N. García, C. Pérez, R. Morales, y A. Compañ, "Requerimientos de un sistema de telecirugía mínimamente invasiva", *Actas de las XXVII Jornadas de Automática*, pp. 3-7. 2006.
- [18] AnthroTronix Inc. *Acceleglove. Control in hand - User Guide*, versión 1.1.1, 2011.
- [19] T. Mitchell, "The sound catcher". *Nature*, 486(472), 2012.
- [20] L. J. Acuña, y S. D. Zapata, "Diseño de un sistema de adquisición y procesamiento de los movimientos de los dedos índice, medio y pulgar mediante guante de datos", Tesis de grado, Universidad Central, Bogotá, 2013.
- [21] E. Rocha, J. Lara, y P. Gómez, "Morfología de manos y pies", en *Escultura de uñas y estética de manos y pies*, p. 8, McGraw Hill, 2012.
- [22] F. Quiroz, *Anatomía humana*, Ed. Porrúa México, pp. 264-277, 1966.
- [23] E. A. Portilla, O. F. Avilés, R. Piña, P. A. Niño, E. Moya, y M. Molina, "Análisis cinemático y diseño de un mecanismo de cuatro barras para falange proximal de dedo antropomórfico", Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, 2010.
- [24] Sigma Electrónica, Tarjeta MMA7361L, Disponible en: <http://www.sigmaelectronica.net/manuals/HOJA%20REFERENCIA%20TARJETA%20MMA7361L.pdf>.
- [25] Texas Instruments, Integrado LM1117-N, Disponible en:
- [26] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1117-n.pdf>

PLATAFORMA DIDÁCTICA PARA ROBÓTICA PARALELA

Didactic platform for parallel robotics

RESUMEN

Este artículo se desarrolla en el contexto de la robótica paralela. Específicamente, se aborda el problema de la robótica educacional desde el diseño modular de una plataforma didáctica. La metodología atiende dos de los roles identificados para la robótica educacional: el robot como proyecto de programación, y como foco de aprendizaje. La metodología se aplicó en el desarrollo de un sistema de tres grados de movilidad en el que se ponderaron subsistemas disponibles en un inventario o que fueran de bajo costo: la interfaz de usuario se desarrolló en iOS para iPad, aprovechando las ventajas de la tecnología móvil y de la comunicación inalámbrica; el módulo de control de los servomotores se programó en Arduino UNO con bajo costo y código abierto; y el sistema mecánico se construyó con elementos de bajo costo y de modelismo (servomotores y articulaciones). La metodología modular propuesta admite modificaciones por subsistemas (interfaz, control, comunicaciones, sistema mecánico), que permiten reciclar el sistema para labores de investigación y desarrollo en grupos interdisciplinarios y con estudiantes de diversas ingenierías.

Palabras clave: robot paralelo, robótica educacional, mecatrónica.

ABSTRACT

This paper is developed in parallel robotics context. Specifically, the problem of educational robotics is addressed by the modular design of a didactic platform. Methodology is intended to handle with two roles of educational robotics: the robot as a programming project, and as a learning focus. Methodology was applied in developing a three-degrees of mobility system weighing the availability or low-cost when subsystems were analyzed: hence, user interface was developed in iOS for iPad, taking advantage of mobile technology and wireless communication, control modules of servomotors were programmed in Arduino UNO with low cost and open code, and the mechanical system was constructed with low-cost elements and others for hobby models (servomotors and pairs). The proposed modular methodology allows the system recycling, for research and development activities, conducted by interdisciplinary groups and engineering students.

Keywords: parallel robotics, educational robotics, mechatronics.

1. INTRODUCCIÓN

El marco general en el que se desarrolla este trabajo es el de la robótica paralela. Particularmente, se aborda la robótica en la educación a partir del diseño de un sistema didáctico basado en un mecanismo paralelo y un sistema de teleoperación y control.

La educación se ha constituido en un área de aplicación de la robótica, y en ella cumple tres roles identificados por [[HYPERLINK \l "Mil08" 1](#)]: (i) el robot como proyecto de programación, (ii) el robot como foco de aprendizaje, y (iii) el robot como colaborador en el aprendizaje. Para cada uno de estos roles se han identificado beneficios potenciales [1]: (i) estimular el aprendizaje en cursos de programación en los que el estudiante desarrolla su habilidad con manifestaciones en un objeto concreto (el robot es un actor en un mundo real [[HYPERLINK \l "Giu12" 2](#)]); (ii) estimular el interés general en la ciencia, en la tecnología y en la

RUBÉN DARÍO FLÓREZ

Ingeniero electricista, M.Sc.

Profesor

Grupo Automática

Universidad Autónoma de Manizales

1

SEBASTIÁN DURANGO

Ingeniero mecánico, Ph.D.

Profesor

Grupo Diseño Mecánico y
Desarrollo Industrial

Universidad Autónoma de Manizales

sebastiandi@autonoma.edu.co

DIANA YULIETH SOTO

Estudiante Ingeniería Mecánica

Grupo Diseño Mecánico y
Desarrollo Industrial

Universidad Autónoma de Manizales

diana.sotop@autonoma.edu.co

ingeniería, y por ese medio involucrar activamente a los estudiantes en la apropiación de la tecnología, de forma persistente, en su futuro; y (iii) potenciar los proyectos académicos, acompañándolos con una fuente de cuestionamiento, en la forma de un robot altamente funcional.

En [1] se identifican dos categorías de plataformas educacionales: (i) las de investigación, con costo elevado y alta sofisticación; y (ii) las de bajo costo, en la forma de plataformas o de kits.

Este trabajo se enfoca en el diseño de una plataforma educacional de bajo costo en la que se vinculan tecnologías comunes al ámbito académico.

Un estudio sobre robots móviles para educación se presenta en [[HYPERLINK \l "Ara14" 3](#)]. En este estudio, el centro del trabajo es la evaluación de plataformas comerciales controladas con Arduino y programadas con la librería libre *Robot Operating System* (ROS). El trabajo desarrolla un controlador específico

para la integración Arduino-ROS y su resultado se corresponde con el tercer beneficio propuesto en [1]: plataformas de acompañamiento con facilidad de uso, que promueven el desarrollo de investigaciones distintas al desarrollo del robot. En [[HYPERLINK \l "Cru12" 4](#)] también hay un enfoque centrado en el acompañamiento de proyectos escolares con robots. El trabajo presenta los beneficios de usar una configuración *out-of-the-box* de una plataforma comercial (LEGO NXT) como caso de estudio transversal en las áreas de adquisición de datos, ingeniería de control y sistemas en tiempo real.

En [5] se resalta la importancia de incluir al estudiante de ingeniería en el desarrollo y diseño de robots, como medio útil para proyectar los fundamentos de su profesión, con el objetivo de marcar una diferencia en la evolución de su vida estudiantil. Así, el proyecto robótico se constituye en una motivación que genera ideas que se visualizan en tiempo real y en un sistema tangible. También se resalta la interacción interdisciplinar y el ambiente maestro-aprendiz, en el que se intercambian roles y que favorecen el desarrollo de la autoestima [[HYPERLINK \l "Mil08" 1](#)].

El esquema del presente artículo es el siguiente: la metodología de diseño para una plataforma robótica educativa se presenta en la sección 2.1; el uso de la metodología en el diseño y construcción de un sistema de tres grados de movilidad se desarrolla en la sección 2.2; y las conclusiones y recomendaciones están en la sección 0. Adicionalmente, en el Apéndice se desarrolla el modelo cinemático del robot de la sección 2.2.

2. CONTENIDO

Las metodologías recientes para el desarrollo de plataformas robóticas tienen enfoques modulares para *hardware*, *software*, y para la integración *hardware-software* [6], [7]. Estos enfoques apuntan a reducir los tiempos de desarrollo de los robots, optimizando los recursos en la aplicación, en lugar de hacerlo en la implementación [7]. Este trabajo está construido con un enfoque modular en el que se aprovechan y se desarrollan módulos de *software* y *hardware*, para el diseño y construcción de una plataforma robótica con fines educativos.

2.1. Metodología

La plataforma para robótica educativa se desarrolló siguiendo dos de los roles identificados para la robótica educativa [1]: el robot como proyecto de programación y el robot como foco de aprendizaje. De las anteriores consideraciones se desprendieron los criterios de diseño:

- (i) Robot con $w \geq 2$ grados de movilidad.
- (ii) Estructura con interacciones por cinemática directa y por cinemática inversa.
- (iii) Interfaz de usuario desde dispositivos de uso común en estudiantes (teléfono inteligente o tableta).

- (iv) Servomotores de bajo costo como actuadores.
- (v) Control de los servomotores desde una plataforma electrónica de fuente abierta y de bajo costo.
- (vi) Comunicación inalámbrica controlador-interfaz implementada en *hardware* de código abierto.

Esquema funcional. El desarrollo del conjunto de criterios lleva a un sistema maestro-esclavo en el que se identifican los siguientes elementos: (i) maestro: interfaz de usuario y funciones de cinemática inversa y directa; (ii) unidad de control electrónico de los servomotores; y (iii) esclavo: mecanismo. En términos de las arquitecturas de control presentadas en [8], el sistema se limita a control directo y teleoperación bilateral. Las relaciones entre los grupos se presentan en la Figura 1.

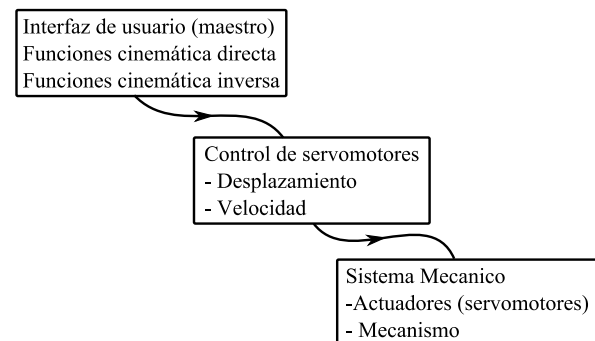


Figura 1. Esquema funcional para el desarrollo de una plataforma didáctica para robótica

2.2. Resultados

Los criterios de diseño se evaluaron según la oportunidad y conveniencia; por ejemplo, se priorizaron los recursos disponibles en el inventario, y las capacidades de diseño y desarrollo de los investigadores, siempre que fueran compatibles con la metodología de desarrollo modular. Se llegó a:

- (i) Robot con $w = 3$ grados de movilidad, con capacidad de trazar una trayectoria en el plano $X-Y$ y movimiento discreto de la herramienta *on-off* en Z .
- (ii) Estructura cerrada (robot paralelo), formada exclusivamente por pares de giro. La solución se presenta en la Figura 2. Para el movimiento en el plano se seleccionó una estructura simétrica de dos piernas formada por cuatro eslabones móviles ($I-4$) y cinco articulaciones de giro (A_1, A_2, B_1, B_2, P) con ejes perpendiculares al plano $X-Y$. Como pares de entrada se seleccionaron A_1 y A_2 . El movimiento discreto del eje Z se implementó mediante articulaciones colineales en la dirección $X-X$ pasando por la línea de los pares A_i .

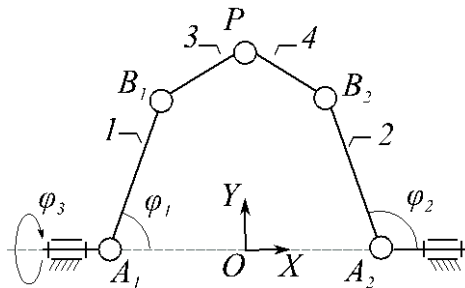


Figura 2. Robot paralelo de 3 grados de movilidad. ϕ_i , para coordenadas generalizadas: $i = 1, 2$, control en el plano X-Y, $i = 3$, control discreto del eje Z

- (iii) Interfaz de usuario desarrollada para iPad.
- (iv) Servomotores de aeromodelismo para el control de las coordenadas generalizadas $\phi_i, i = 1, 2, 3$.
- (v) Arduino UNO para el control de los servomotores.
- (vi) Módulo WiFi para Arduino UNO, para la comunicación controlador–interfaz.

Esquema funcional. Se desarrolló el sistema maestro-esclavo descrito en la sección 2.1. Se describen los grupos funcionales:

- (i) Maestro: La interfaz de usuario se desarrolló en iPad. La interacción con el sistema se hace a través de la pantalla táctil. Se desarrollaron tres ambientes:

Interfaz para acción directa. (a) Cinemática inversa, Figura 3-a. Se fija un punto en un espacio de trabajo limitado por el círculo máximo inscrito y se obtiene el valor de las coordenadas generalizadas (ángulos de los servomotores) vía cinemática inversa. (b) Cinemática directa, Figura 3-b. Se fijan valores para las coordenadas generalizadas (ángulos de los motores) y se visualiza la configuración del sistema en pantalla (Figura 3-c). El modelo cinemático del sistema se desarrolla modularmente en el apéndice 5.

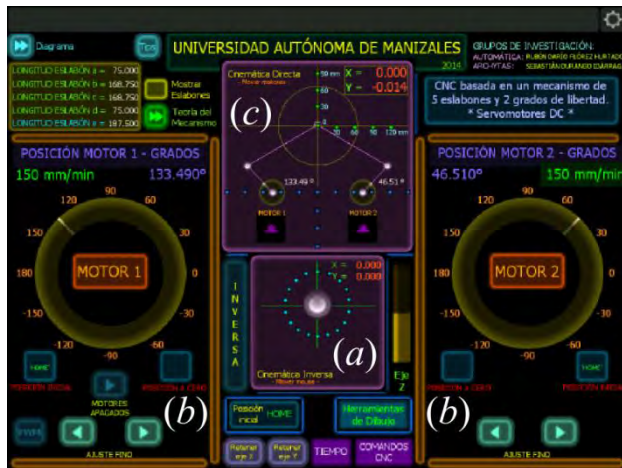


Figura 3. Interfaz de usuario. (a) Interfaz para cinemática inversa; (b) Diales de control para cinemática directa; (c) Visualización del sistema.

Interfaz para trazos. (a) Trazo libre (mano alzada), Figura 4-a. Se desarrolla un trazo libre en el espacio de trabajo limitado por el círculo máximo inscrito y se obtiene la trayectoria de los motores vía cinemática inversa. (b) Trayectorias prediseñadas, Figura 4.b. Se elige de una lista de trayectorias prediseñadas (mano, polígono, estrella, entre otros). La trayectoria de los motores se obtiene por cinemática inversa.

Reloj digital. El sistema se enlaza al reloj del iPad y se fija una hora, en formato hh:mm:ss, para representarse por el robot. Los dígitos se vectorizan y las trayectorias de los motores se obtienen vía cinemática inversa.

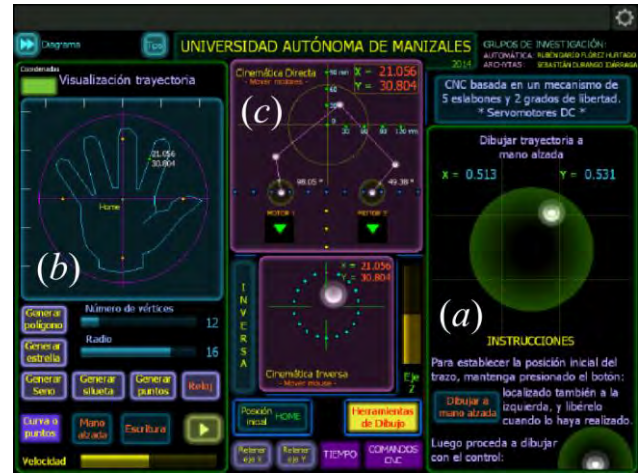


Figura 4. Interfaz de usuario. (a) Trazo libre (mano alzada); (b) Trayectorias prediseñadas; (c) Visualización del sistema

- (ii) Plataforma electrónica de control. El control de los servomotores se desarrolló en una plataforma de código abierto Arduino UNO. Los cálculos se desarrollaron con aritmética de punto flotante (IEEE 754). El cálculo de los valores de referencia para las coordenadas generalizadas se delegó en el iPad, con lo cual se liberó la limitada capacidad del controlador electrónico. La comunicación entre el Arduino y el maestro se desarrolló inalámbricamente usando protocolo WiFi. La distribución de las funciones se presenta en la Figura 5 y el sistema construido se muestra en la Figura 6.

Funciones implementadas en Ipad	Funciones implementadas en Arduino UNO + WiFi
Trazado de polígonos	Recepción de parámetros de posición y velocidad angular de servomotores (formato IEEE754)
Conversión de trazos (mano alzada) a figuras vectorizadas	Control de servomotores x-y: técnicas PWM-modulación por ancho de pulso
Coordenadas de perforaciones: desarrollo de circuitos impresos	Control servomotor eje z
Cálculo de la cinemática directa	Procesamiento de coordenadas xyz para cálculos de cinemática inversa
Cálculo de la cinemática inversa	Procesamiento de dígitos ASCII para trazado de reloj digital
Visualización de movimiento en un plano Cartesiano	
Calibración de servomotores (2 control x-y, 1 control z)	
Lectura del reloj y vectorización para cinemática inversa	
Interfaz para la cinemática directa mediante diales	

Figura 5. Distribución de funciones de control y cálculos de la plataforma para robótica educacional.

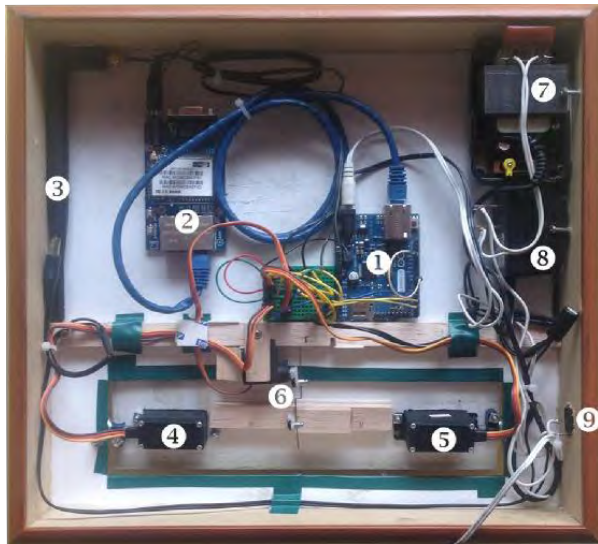


Figura 6. Elementos del sistema de control y potencia de la plataforma para robótica educacional. ① Arduino UNO. ② Módulo WiFi. ③ Antena Wifi. ④ ⑤ Servomotor X-Y. ⑥ Servomotor Z. ⑦ ⑧ Fuente. ⑨ Interruptor general.

(iii) Esclavo. El mecanismo de tres grados de movilidad (Figura 7) se construyó siguiendo el enfoque modular. Las articulaciones de rotación son de tipo estándar en modelismo. Como herramienta se usó un marcador borrable que escribe sobre una superficie paralela al plano de funcionamiento del sistema cuando el servomotor 3 (eje Z) está actuado (*on*).

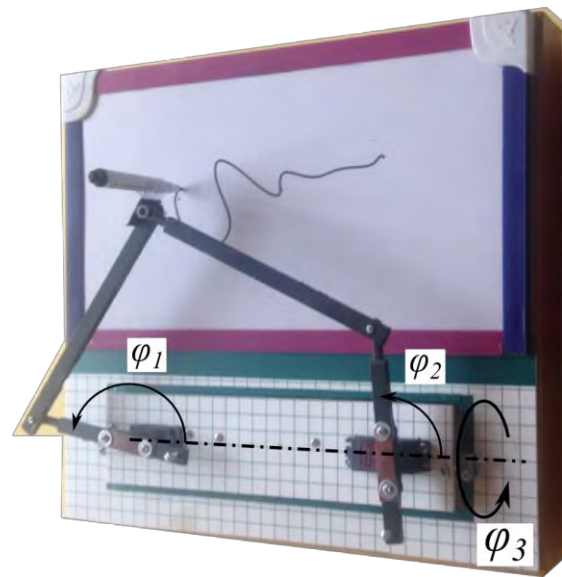


Figura 7. Mecanismo de tres grados de movilidad.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se estableció una base computacional, electrónica y mecánica para el diseño, la fabricación y la puesta en funcionamiento de una plataforma para robótica educacional. Los criterios de diseño se establecieron buscando una fuente de alta motivación hacia el estudio de ciencias básicas y aplicadas, que permita despertar el interés en algunos y afianzarlo en otros, para que jóvenes y universitarios incursionen en estudios de ingeniería, que nuestro país (Colombia) requiere urgentemente.

El prototipo construido como herramienta didáctica establece un método de diseño modular de máquinas robóticas basado en la estructura *maestro-esclavo*. El desarrollo de cada módulo requirió de la integración de diversas áreas del conocimiento, por lo que la robótica proporciona, a quien la estudia, mecanismos de aprendizaje significativo y trabajo en equipo.

Desde el punto de vista computacional, no se usaron herramientas altamente sofisticadas ni costosas. El programa de alto nivel para la interfaz se desarrolló usando un subconjunto de instrucciones del lenguaje C++. Las comunicaciones se resolvieron a través de protocolos WiFi. Las funciones de cinemática directa e inversa, comunicaciones e interfaz se integraron bajo el sistema operativo iOS. El control de bajo nivel para los servomotores se desarrolló en Arduino UNO, plataforma de control de fuente abierta y bajo costo.

El desarrollo modular de la plataforma se evidencia en la independencia de la interfaz (maestro), el módulo de control de bajo nivel (Arduino) y el sistema mecánico (esclavo). Por ejemplo, la utilización de comunicaciones inalámbricas bajo técnicas WiFi permite que el sistema pueda controlarse desde dispositivos computacionales

diferentes al iPad y con diversos lenguajes de programación; solo se necesita el soporte de redes.

El uso de comunicaciones a través de redes de datos otorga otras capacidades modulares que podrán ser desarrolladas como trabajo futuro. Específicamente, la comunicación por redes permitiría que el dispositivo pueda ser manipulado por estudiantes en un contexto de enseñanza mediante aulas remotas de clase apoyadas por TIC; basta agregar una cámara de video y una interfaz soportada mediante una página web. Así, el estudiante podría desarrollar sus cálculos de cinemática directa e inversa y observar remotamente los resultados de los movimientos.

Desde el enfoque de diseño y funcionamiento modular se proponen algunas alternativas de desarrollo e investigación que pueden ser emprendidas en equipos interdisciplinarios y de estudiantes de ingeniería:

- Escalamiento del sistema mecánico y construcción de prototipo industrial para corte de materiales blandos.
- Desarrollo de interfaz (maestro) para plataformas distintas al iPad.
- Desarrollo de página web para control e interacción remota.
- Adaptación del sistema para máquina de coordenadas (escáner 2D y escáner 3D modificando la movilidad en la dirección Z).
- Desarrollo del código *G* en alto nivel (interacción con el usuario) y bajo nivel (interacción con el sistema mecánico).
- Modificación de la plataforma para posicionamiento de piezas en líneas de producción (mecanismo *pick and place*).

Las modificaciones del sistema podrían tener implicaciones en las estrategias de control y calibración del sistema, por ejemplo, en el caso de un aumento representativo en las inercias y velocidades de operación, se necesitarían control dinámico e identificación inercial.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Miller, I. Nourbakhsh, y R. Siegwart, "Robots for education", *Springer Handbook of Robotics*, Bruno Siciliano y Oussama Khatib, Eds.: Springer, 2008.
- [2] A. Giuseppe y P. Martina, "Educational robotics between narration and simulation", *Procedia*, vol. 51, pp. 104-109, 2012.
- [3] A. Araújo, D. Portugal, M. Couceiro, y R. Rocha, "Integrating Arduino-based educational mobile robots in ROS", *J. Intell. Robot. Sys.*, pp. 1-18, February 2014.
- [4] A. Cruz et al., "A Lego Mindstorms NXT approach for teaching at Data Acquisition, Control Systems Engineering and Real-Time Systems undergraduate courses", *Comput. Educ.*, vol. 59, pp. 974-988, 2012.

- [5] C-W. Chang, J-H. Lee, C-Y. Wang, y G-D. Chen, "Improving the authentic learning experience by integrating robots into mixed-reality environment", *Comput. Educ.*, vol. 55, no. 4, pp. 1572-1578, 2010.
- [6] A. Bonarini, M. Matteucci, M. Migliavacca, y D. Rizzi, "R2P: An open source hardware and software modular approach to robot prototyping", *Robot. Auton. Syst.*, vol. 62, pp. 1073-1084, 2014.
- [7] A. Valero, J. González, y R. Treviño, "A new paradigm for open robotics research and education with C++ OOML", *Auton. Robot.*, vol. 34, pp. 233-249, 2013.
- [8] G. Niemeyer, C. Preusche, y G. Hirzinger, "Telerobotics", en *Springer Handbook of Robotics*, Bruno Siciliano and Oussama Khatib, Eds.: Springer, 2008.
- [9] M. Z. Kolovski, A. N. Evgrafov, Yu. A. Semenov, y A. V. Slousch, *Advanced Theory of Mechanisms and Machines*. Berlin, Springer-Verlag, 2000.
- [10] S. Durango, C. Giraldo, G. Calle, y L. Mesa, "Dynamics of planar mechanisms by a modular approach", *Ingeniería y Competitividad*, vol. 16, no. 1, pp. 159-168, 2014.
- [11] S. Durango, "Dinámica modular con Assur Toolbox", Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, Registro de software 13-39-494 de la Dirección Nacional de Derechos de Autor de Colombia, 2013.
- [12] T. Yoshikawa, *Foundations of Robotics*. Cambridge: The MIT Press, 1990.

5. APÉNDICE

Modelo cinemático

Para el desarrollo del modelo cinemático se continuó con un enfoque modular. La base modular usada en este trabajo es el concepto de grupo estructural simple [9], una cadena cinemática en la que el número de entradas independientes corresponde con el grado de movilidad de la cadena y que no puede ser dividida en cadenas más simples con la misma característica. Los módulos para el análisis cinemático fueron desarrollados previamente durante un trabajo en dinámica modular [10] y hacen parte del *software* Assur Toolbox, registrado por la Universidad Autónoma de Manizales ante la Dirección Nacional de Derechos de Autor de Colombia [11].

Modelo geométrico directo. El mecanismo se divide según dos funciones: la cadena para el movimiento en el plano *X-Y*, y el movimiento discreto en *Z*. A su vez la cadena para el movimiento *X-Y* se desagrega en tres módulos: dos grupos simples formados por un eslabón y un par de giro, con una entrada independiente cada uno, y una cadena con dos eslabones y tres pares de giro sin entradas independientes (un grupo de Assur). La desagregación se representa en la Figura 8. Cada módulo tiene una solución independiente, tanto para el problema de posición como para el de velocidad.

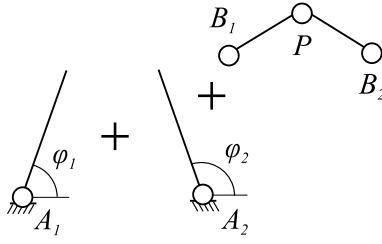


Figura 8. Desagregación de un mecanismo plano de 2 grados de movilidad en grupos estructurales simples. Modelo directo.

Grupo simple con un eslabón, un par de giro y una entrada independiente. Se plantea en una forma genérica y se presenta en la figura 90. La entrada es por el par activo L , entre el eslabón y el bastidor. El modelo del grupo se presenta en (1).

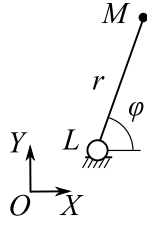


Figura 9. Grupo simple con un eslabón, un par y una entrada independiente.

$$\begin{aligned} x_M &= x_L + r \cos \varphi \\ y_M &= y_L + r \sin \varphi \end{aligned} \quad (1)$$

Grupo de Assur con dos eslabones y tres pares de giro. Se plantea de forma genérica y se presenta en la Figura 10. El grupo entra en los pares K e I . Las restricciones cinemáticas se plantean en (2).

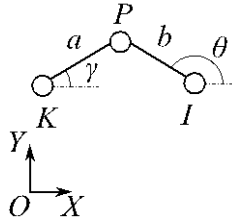


Figura 10. Grupo de Assur con 2 eslabones y 3 pares de giro.

$$\begin{aligned} x_K + a \cos \gamma - b \cos \theta - x_I &= 0, \\ y_K + a \sin \gamma - b \sin \theta - y_I &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

El sistema se lleva a la forma $k_1 \sin \theta + k_2 \cos \theta = k_3$. Si $k_1^2 + k_2^2 - k_3^2 \geq 0$; entonces el sistema tiene solución como en (3) [12]:

$$\theta = \text{atan2}(k_1, k_2) \pm \text{atan2}(\sqrt{k_1^2 + k_2^2 - k_3^2}, k_3), \quad (3)$$

donde: $k_1 = 2b(y_I - y_K)$,

$$k_2 = 2b(x_I - x_K),$$

$$k_3 = a^2 - b^2 - (x_I - x_K)^2 - (y_I - y_K)^2, \text{ y}$$

$\text{atan2}(\cdot, \cdot)$ es la función arcotangente de dos argumentos que regresa el ángulo en los cuatro cuadrantes. El ángulo γ se resuelve en (5) a partir de las coordenadas de los puntos K de entrada, y P de (4):

$$x_P = x_I + b \cos \theta \quad (4)$$

$$y_P = y_I + b \sin \theta$$

$$\gamma = \text{atan2}(y_P - y_K, x_P - x_K). \quad (5)$$

Implementación del modelo geométrico directo. El modelo se desarrolla siguiendo la secuencia de la desagregación en grupos simples. En este caso se inicia por la solución de los grupos simples de una movilidad (1), en la que la entrada son los ángulos φ_i . Las salidas serán las posiciones de los puntos B_i .

$i = 1, 2$. Las posiciones de los puntos B_i constituyen las entradas del grupo de Assur; entonces se resuelven las ecuaciones (3) a (5), que determinan la posición del punto P .

Modelo geométrico inverso. El mecanismo se divide según las mismas funciones que para el modelo directo. En este caso, para el movimiento en el plano $X-Y$, se considera que la entrada es la posición del punto P y se busca resolver las coordenadas generalizadas φ_i , $i = 1, 2$. El mecanismo se desagrega en dos

grupos simples; cada uno es un grupo de Assur con dos eslabones y tres pares. La desagregación se presenta en la Figura 11. Para la solución de los grupos se recicla el módulo correspondiente, representado por las ecuaciones (3) a (5).

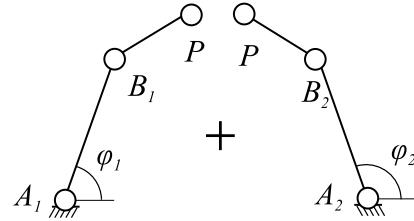


Figura 11. Desagregación de un mecanismo plano de 2 grados de movilidad en grupos estructurales simples. Modelo inverso

Implementación del modelo geométrico inverso. El modelo inverso se desarrolla siguiendo la desagregación en grupos simples. En este caso se tienen dos grupos que tienen la misma jerarquía (pueden resolverse en paralelo). La información de entrada para cada grupo es la posición del punto P y la posición del par fijo A_i . La solución de las coordenadas generalizadas φ_i se obtiene de las ecuaciones (3) a (5).

Modelo cinemático. El modelo cinemático se desarrolló manteniendo la estrategia modular del modelo geométrico. Las desagregaciones en grupos estructurales simples se mantienen según sea el caso directo o inverso. En (6) se plantea de forma general el modelo cinemático de los grupos simples.

$$\frac{\partial F}{\partial \Gamma} \dot{\Gamma} + \frac{\partial F}{\partial E} \dot{E} + \frac{\partial F}{\partial Q} \dot{Q} = 0, \quad (6)$$

donde F es el vector con las ecuaciones de grupo, E es el vector de las coordenadas de grupo definidas por los pares en los que el grupo se conecta con otras cadenas, Γ es el vector de coordenadas complementarias que pueden incluir las salidas, Q es el vector de las coordenadas de entrada independientes. Por ejemplo, para el grupo simple con dos eslabones y tres pares de rotación se obtiene (7):

$$\begin{aligned}
 F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_k + a \cos \gamma - b \cos \theta - x_l \\ y_k + a \sin \gamma - b \sin \theta - y_l \end{bmatrix}, \\
 \Gamma = \begin{bmatrix} \Gamma_1 \\ \Gamma_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \gamma \\ \theta \end{bmatrix}, \\
 E = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ x_l \\ y_l \end{bmatrix}, \\
 Q &= [].
 \end{aligned} \tag{7}$$

Los modelos directo e inverso se obtienen a partir de (6), aislando las velocidades de salida $\dot{\Gamma}$ o las velocidades de entrada $\dot{Q}$, según corresponda.

ENTORNO VIRTUAL PARA LA SIMULACIÓN DE UN *QUADROTOR* USANDO EL *FRAMEWORK* ROS HYDRO

Virtual environment for the simulation of quadrotor using the framework ROS Hydro

RESUMEN

Este artículo presenta el desarrollo de cuatro entornos virtuales para la simulación de un *quadrotor*, de manera que permitan la prueba de algoritmos, sensores y diversos modelos de este dispositivo, con el fin de minimizar costos y tiempo en el proceso de desarrollo. Dichos entornos permitirán observar igualmente el comportamiento del *quadrotor* en ambientes cerrados y abiertos y obtener información para evitar posibles daños en el mundo real.

Palabras clave: entorno virtual, Gazebo, *quadrotor*, ROS, simulación.

ABSTRACT

This paper presents the development of four virtual environments for the simulation of a quadrotor, to allow the test of algorithms, sensors and various models of this device, in order to minimize costs and time in the process of development. These environments will allow to observe the quadrotor behavior in indoors and outdoors scenarios and to obtain information to prevent the damage of it in the real world.

Keywords: Gazebo, *quadrotor*, ROS, simulation, virtual environment.

JUAN PABLO ROJAS

Estudiante Ingeniería Mecatrónica
Universidad Piloto de Colombia
jrojas87@upc.edu.co

RUBÉN HERNÁNDEZ

Ingeniero mecatrónico, Ph.D.
Docente investigador
Universidad Piloto de Colombia
ruben.hernandez@upc.edu.com

ÓSCAR AVILÉS

Ingeniero mecánico, Ph.D.
Docente investigador
Universidad Piloto de Colombia
oscar-aviles@upc.edu.co

JANITO VAQUEIRO

Ingeniero mecánico, Ph.D.
Profesor Titular
Laboratorio de Movilidad Autónoma
Universidad Estatal de Campinas
janito@fem.unicamp.br

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de entornos virtuales que permitan simular diversas variables físicas y sistemas ajenos a estas se encuentra en auge, ya que permite adquirir información acerca del desempeño de una máquina o algoritmo de una manera eficiente y sin necesidad de poner en riesgo la integridad física de los aparatos [1].

Por otra parte, se puede observar que los entornos virtuales no cuentan con mapas predefinidos que permitan probar algoritmos de control o sensores que pueda contener el sistema que se quiere probar y esto da como resultado un aumento en el tiempo de pruebas, ya que se tiene que desarrollar un mapa y establecer las variables físicas del sistema [2], [3].

Por lo anterior, en este trabajo se buscan las necesidades de diferentes proyectos y robots, y con base en ellas [4] [5], [6], se diseñan cuatro mapas que permitan, de una manera genérica, realizar las pruebas necesarias para confirmar el funcionamiento óptimo de los sensores y algoritmos. Se aclara que dichos mapas han sido probados en el entorno Gazebo, herramienta relacionada directamente con el *framework* ROS (Hydro Medusa).

Se aclara también que las pruebas de estos mapas han sido realizadas usando el modelo de un *quadrotor*, por lo que, antes de las pruebas, se realizó un análisis cinemático y dinámico que permitiera tener una idea básica de la respuesta de este dispositivo frente a los ambientes diseñados.

Este proyecto se ha desarrollado con el fin de aumentar las herramientas y ayudas disponibles para estos *softwares*.

2. CONTENIDO

Se seleccionó el simulador Gazebo para desarrollar los entornos que se diseñaron, ya que es capaz de producir gráficas en tres dimensiones, simular múltiples modelos robóticos, simular de manera precisa la interacción dinámica entre diversos objetos y permitir la interacción con diversas plataformas, por ejemplo ROS.

La selección de ROS como *framework* para el procesamiento de la información, y como enlace entre los modelos del mundo y los robots, se debe a que ROS tiene una estructura modular y distribuida, y cuenta con una gran variedad de librerías y paquetes que facilitan la simulación, análisis e integración de diversos sistemas.

Es importante tener en cuenta que tanto Gazebo como ROS emplean lenguaje XML para el modelamiento y configuración tanto de los robots como de los ambientes. Los archivos *.world están encargados de brindar las configuraciones necesarias para el ambiente, además de suministrar la dirección y la escala del CAD del entorno. Los archivos *.urdf son los encargados de describir y relacionar cada una de las partes del robot, aclarando que la descripción cubre las figuras básicas o descripciones físicas del robot así como las restricciones físicas de cada una [7], [8].

Un ejemplo de la configuración de estos archivos puede verse en la figura 1, en la cual se observa una parte del archivo *.world, que describe las características físicas que va a tener el ambiente.

```
<physics type="ode">
  <gravity>0 0 -9.81</gravity>
  <ode>
    <solver>
      <type>quick</type>
      <dt>0.001</dt>
      <iters>10</iters>
      <sor>1.3</sor>
    </solver>
    <constraints>
      <cfm>0.0</cfm>
      <erp>0.2</erp>
      <contact_max_correcting_vel>10
    </contact_max_correcting_vel>
      <contact_surface_layer>0.001
    </contact_surface_layer>
    </constraints>
  </ode>
</physics>
```

Figura 1. Ejemplo de la aplicación de un archivo *.world

3. ROS Y GAZEBO

3.1 Integración de ROS y Gazebo

Para esta integración es necesario tener en cuenta qué tipo de instalación se realizó. Si se hizo la instalación completa de ROS, solo se verifica el correcto funcionamiento de Gazebo y para esto se debe aplicar el comando [9]:

- `roslaunch gazebo_ros gazebo`

De no ser así, se debe ejecutar la instalación de dicho paquete y para ello se ejecuta el comando

- `sudo apt-get install ros-hydro-simulator-gazebo && roslaunch gazebo_ros gazebo`

Los comandos anteriores deberán mostrar una ventana como la que se muestra en la figura 2.

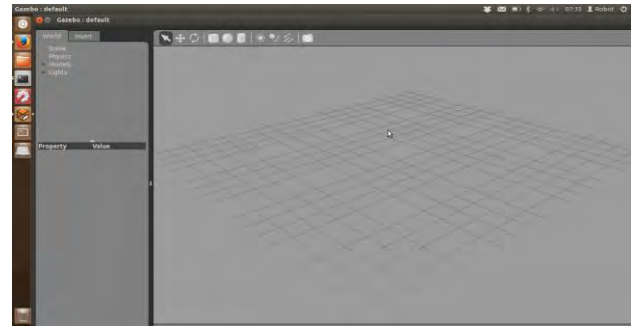


Figura 2. Integración de Gazebo y ROS

3.2 Nodos usados en ROS

Los nodos en ROS son programas escritos en C++ o Python, que se encuentran dentro del paquete del usuario. Ellos describen el funcionamiento de alguna parte del robot; un ejemplo de un nodo podría ser un programa en C++ que reciba los comandos del teclado. Después de que un nodo ha completado su función, este se comunica con el nodo principal y transmite la información dependiendo de la descripción [10].

En este caso particular, se usó un nodo para la recepción de datos de los sensores que se emplearon de manera virtual; la descripción de dichos códigos puede verse en la figura 3.

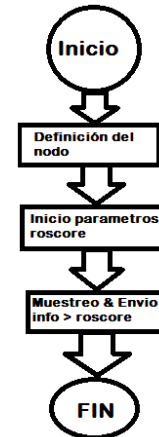


Figura 3. Diagrama de flujo para el manejo de sensores en ROS

3.3 Aplicación de los entornos diseñados

Se diseñaron cuatro ambientes con el fin de suplir los valores necesarios para la prueba de algunos sensores, como cámaras, láser e IR.

Estos ambientes son áreas de 70 metros cuadrados, en las cuales se definieron dos como áreas cerradas, que tienen algunos obstáculos, patrones de colores y vías determinadas, que permiten observar el desempeño del *quadrotor* en espacios reducidos; uno de los ambientes cerrados puede verse en la figura 4.



Figura 4. Ejemplo de ambiente cerrado: juan_home.

Se definieron también dos áreas abiertas, con diferentes alturas, obstáculos y figuras al azar, que permitirán observar el desempeño del *quadrotor* frente a la generación de trayectorias y ubicación de objetivos; en la figura 5 puede verse uno de los ambientes diseñados.

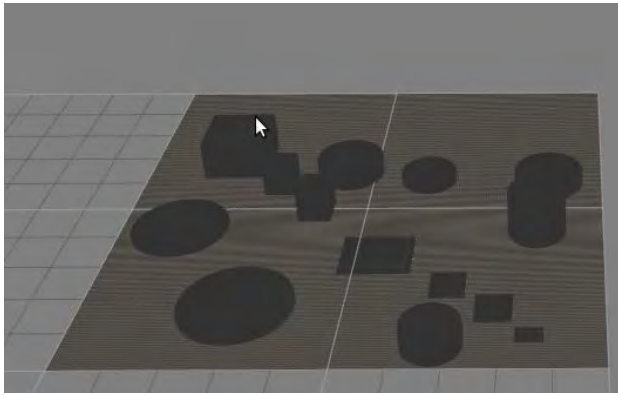


Figura 5. Ejemplo de ambiente abierto: juan_figures

4. MODELAMIENTO DEL *QUADROTOR*

Para realizar el modelamiento del *quadrotor* se tuvieron en cuenta sus geometrías, velocidades y fuerzas, de forma que se pudiera obtener el modelo cinemático y dinámico que describe al sistema.

4.2 Modelo cinemático

Para obtener el modelo cinemático se tuvieron en cuenta las inercias de los ejes X, Y y Z, además de las velocidades de cada eje, U, V y W, respectivamente.

Es importante tener en cuenta que existe una relación entre la velocidad y la posición del sistema. Esta relación está dada por (1):

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x \\ y \\ -z \end{pmatrix} = R_l^p \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} \quad (1)$$

donde R es la matriz de rotación.

Luego de obtener la relación entre la posición y la velocidad, es necesario obtener la relación entre los ángulos de giro y las velocidades correspondientes; para esto se define un punto mínimo de cambio, el cual está definido por (2):

$$I = R_{p2}^l(\dot{\phi}) = R_{p1}^{p2}(\dot{\theta}) = R_p^{p1}(\dot{\beta}) \quad (2)$$

De esta relación se obtiene (3)

$$\begin{pmatrix} \dot{R} \\ \dot{P} \\ \dot{Y} \end{pmatrix} = R_{p2}^l(\dot{\phi}) \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + R_{p2}^l(\dot{\phi}) R_{p1}^{p2}(\dot{\theta}) \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + R_{p2}^l(\dot{\phi}) R_{p1}^{p2}(\dot{\theta}) R_p^{p1}(\dot{\beta}) \begin{pmatrix} \dot{\beta} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Solucionando dicha ecuación y despejando, tendríamos que la ecuación que define la cinemática del sistema está dada por (4), así:

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R \\ P \\ Y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \sin(\phi) \tan(\theta) & \cos(\phi) \tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) \sec(\theta) & \cos(\phi) \sec(\theta) \end{pmatrix} \quad (4)$$

Se aclara que R, P y Y corresponden en estas ecuaciones al giro sobre los ejes (*roll*, *pitch*, *yaw*).

4.3 Modelo dinámico

Para la obtención del modelo dinámico se tuvieron en cuenta la gravedad y la masa del *quadrotor*.

El vector velocidad del *quadrotor* está dado por las leyes de Newton, por lo que el movimiento traslacional está dado por (5):

$$f = m \left(\frac{dv}{dt} \right) \quad (5)$$

Donde m es la masa del *quadrotor*, dv/dt , representa la inercia y f es la fuerza total aplicada al *quadrotor*. Si se tiene en cuenta la velocidad del fuselaje con respecto a la inercia total del mismo, se tendría la ecuación (6) [11]:

$$f = m \left(\frac{dv}{dt} + w_{f/i} * v \right) \quad (6)$$

Para expresar la velocidad angular en coordenadas propias del *quadrotor*, se expresa la ecuación anterior teniendo en cuenta que

$$v = (u, v, w)^T \text{ y } w_{b/i} = (p, q, r)^T$$

por lo que (6) se convierte en (7):

$$\begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} rv - qw \\ pw - rw \\ qu - pv \end{pmatrix} + \frac{1}{m} \begin{pmatrix} fx \\ fy \\ fz \end{pmatrix} \quad (7)$$

Además, considerando el movimiento rotacional, se aplican la segunda ley de Newton y la ley de Coriolis, y se obtiene:

$$T = \frac{dm_a}{dt} + w_{b/i} \times m_a \quad (8)$$

donde m_a es el momento angular y T es el torque aplicado.

Con el modelo (8) es posible hallar la matriz de inercias, teniendo en cuenta que $m_a = Jw_{b/i}$. La matriz de inercias está dada por (9):

$$J = \begin{pmatrix} \int (y^2 + z^2) dm & -\int xy dm & -\int xz dm \\ -\int xy dm & \int (x^2 + z^2) dm & -\int yz dm \\ -\int xz dm & -\int yz dm & \int (x^2 + y^2) dm \end{pmatrix} \quad (9)$$

Para simplificar su tamaño se establece (10), así:

$$J = \begin{pmatrix} J_x & J_{xy} & -J_{xz} \\ -J_{xy} & J_y & -J_{yz} \\ -J_{xz} & -J_{yz} & J_z \end{pmatrix} \quad (10)$$

Teniendo en cuenta que el *quadrotor* es simétrico, se puede establecer (11):

$$J_{xy} = J_{xz} = J_{yx} = 0 \quad (11)$$

y con base en esta última ecuación se puede afirmar que J estará dado por (12):

$$J = \begin{pmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{pmatrix} \quad (12)$$

y la inversa de J será (13):

$$J^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{J_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J_z} \end{pmatrix} \quad (13)$$

Sabiendo que la inercia de un cubo está dada por (14),

$$J_c = \frac{M * c^2}{6} \quad (14)$$

se tendrían las representaciones (15), (16) y (17) para cada uno de los ejes:

$$J_x = \left(\frac{M * c^2}{6} \right) + 2l^2 m \quad (15)$$

$$J_y = \left(\frac{M * c^2}{6} \right) + 2l^2 m \quad (16)$$

$$J_z = \left(\frac{M * c^2}{6} \right) + 2l^2 m \quad (17)$$

Teniendo en cuenta lo anterior y definiendo a M como T_x , T_y y T_z , se tendría que la definición para cada uno de los puntos en el espacio del *quadrotor* está definida por (18):

$$\begin{pmatrix} \dot{R} \\ \dot{P} \\ \dot{Y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{J_y - J_x}{J_x} q r \\ \frac{J_z - J_x}{J_y} p r \\ \frac{J_x - J_y}{J_z} p q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{J_x} T \varphi \\ \frac{1}{J_y} T \theta \\ \frac{1}{J_z} T \beta \end{pmatrix} \quad (18)$$

4.4 Ecuaciones del sistema

La dinámica y cinemática del *quadrotor* está definida por (1), (4), (7) y (18), ecuaciones que permiten saber cuál va a ser el comportamiento del aparato en el ambiente virtual.

Estas ecuaciones fueron introducidas en un *script* y relacionadas con la descripción física del *quadrotor*, para poder observar el funcionamiento de este último de la manera más real posible.

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x \\ y \\ -z \end{pmatrix} = R_l^p \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R \\ P \\ Y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \sin(\varphi) \tan(\theta) & \cos(\varphi) \tan(\theta) \\ 0 & \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ 0 & \sin(\varphi) \sec(\theta) & \cos(\varphi) \sec(\theta) \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} rv - qw \\ pw - rw \\ qu - pv \end{pmatrix} + \frac{1}{m} \begin{pmatrix} fx \\ fy \\ fz \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{R} \\ \dot{P} \\ \dot{Y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{J_y - J_x}{J_x} q r \\ \frac{J_z - J_x}{J_y} p r \\ \frac{J_x - J_y}{J_z} p q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{J_x} T \varphi \\ \frac{1}{J_y} T \theta \\ \frac{1}{J_z} T \beta \end{pmatrix} \quad (18)$$

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo de ambientes que permitan simular diversos factores para la prueba de diversos robots y mecanismos permite acelerar el avance de los proyectos y minimiza de manera drástica el tiempo de pruebas de los mismos.

Por otra parte, los entornos de simulación y los mapas virtuales son una ayuda eficaz para la academia así como para la industria, ya que permiten a las personas interactuar con el sistema diseñado y ver de una manera gráfica como este es afectado por los diversos factores.

Es de vital importancia definir la cinemática y la dinámica de los mecanismos, ya que de ellas depende que el sistema interactúe de manera correcta con el ambiente; a su vez ellas establecen las características con las que el sistema de control va a interactuar.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Arshad, J. Jasmal, y S. Sahran, "Teaching robot kinematic in a virtual environment", *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2010*, Vol I, WCECS 2010, Oct. 2010.
- [2] O. Dunkley, J. Engle, J. Sturm, y D. Cremers, "Visual-inertial navigation for a camera-equipped 25g nano-quadrotor" Technical University, Munich.
- [3] S. A. Beltrán, O. Lengerke, H. Gonzales, y F. Mora-Camino, "Control PID de altura de un quadrotor", 3er. Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica, CIM 2011, Bucaramanga, Colombia.
- [4] J. Palm, A. Nelson, y A. Bradford, "Quad-Rotor UAV project", Final Report, DSSL Lab, June 11, 2010.
- [5] S. Bouabdallah, "Design and control of quadrotors with application to autonomous flying", Tesis de doctorado, Facultad de Ciencias y Tecnología, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2007.
- [6] S. Ali Raza, y W. Gueaieb, "Intelligent flight control of an autonomous quadrotor", University of Ottawa, Canada, en **Robotics -Motion Control-**, Federico Casolo (Ed.), ISBN 978-953-7619-55-8, 2010.
- [7] Gazebosim Org., Tomado del link: <http://gazebosim.org/tutorials/?tut=dem>, 8 de septiembre de 2014.
- [8] ROS Org., Tomado del link: <http://wiki.ros.org/urdf>, 10 de septiembre de 2014.
- [9] A. Martinez, y E. Fernandez, "Learning ROS for Robotics Programming", Open Source.
- [10] R. P. Goebel, "ROS by Examples. A Do-It-Yourself Guide to the Robot Operating System", Ed. Lulu, 2012.
- [11] R. W. Beard, "Quadrotor dynamics and control", October 3, 2008, Brigham Young University.

DISEÑO MECÁNICO DEL ACM1PT, PRIMER PROTOTIPO DE UN CARRO AUTÓNOMO PARA MINERÍA

Mechanical design of ACM1PT, First Prototype of an Autonomous Car for Mining Jobs

RESUMEN

El proyecto pretende realizar el diseño y construcción de una plataforma robótica, que tenga capacidad de cargar herramientas de perforación en procesos de exploración, en entornos no estructurados. Esta plataforma debe ser maniobrada de forma remota mediante un protocolo de comunicación inalámbrica tipo Wi-Fi o Bluetooth y debe estar provista de un sistema de soporte que permita efectuar trayectorias de forma autónoma, sin necesidad de intervención humana. Para el caso particular se presenta el proyecto de desarrollo de un robot que efectúa tareas de apoyo en minería de forma remota por teleoperación y con apoyo de sistema autónomo.

Palabras clave: exploración, minería, robótica, seguridad industrial, simulación, vehículos autónomos.

ABSTRACT

The project aims to design and build a robotic platform, capable of uploading tools for drilling exploration processes in unstructured environments. This platform should be able to be remotely maneuvered via a wireless communication protocol, such as Wi-Fi or Bluetooth, and must have a support system to permit further autonomous paths, without human intervention. In this particular case, the project aims to develop a robot to carry out mining support tasks commanded by tele-operation and provided of autonomous system.

Keywords: exploration, mining, robotics, industrial security, simulation, autonomous vehicles.

1. INTRODUCCIÓN

Es muy frecuente que las actividades mineras en Colombia se deban realizar en terrenos de difícil acceso, en zonas con geografía irregular y sin vías principales cercanas. A estas zonas se accede por caminos que no siempre están en buena condición, y las personas tienen que transportarse a pie, en mulas o en otros medios no tecnificados. Para las tareas de exploración, los encargados de realizarlas deben llevar las herramientas para realizar las perforaciones o toma de muestras del subsuelo. Usualmente estos equipos son transportados a un lugar de desembarco, que tiene alguna facilidad de acceso, y trasladados hasta las zonas específicas de perforación, que pueden estar a distancias que oscilan entre 2 y 8 km del sitio de desembarco de los equipos. Para trasladar los equipos por este trayecto hasta el sitio concreto de perforación, las empresas contratan pobladores de la zona, que deben cargar, en grupos de 6 a 8 personas, conjuntos de herramientas con un peso del orden de 300 kg. Aparece entonces la necesidad de reducir los riesgos profesionales de las personas que realizan estas

tareas y por tanto es relevante para el sector minero el desarrollo de un vehículo que pueda efectuar el transporte de los equipos, de forma que se adapte a las condiciones del entorno, en términos de la carga que debe transportarse y de la capacidad de desplazarse en terreno no estructurado.

Para la aplicación que se plantea desarrollar, los parámetros de ingeniería están contenidos en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de diseño.

Descripción	Parámetros
Carga útil	300 kg
Tipo de terreno	Grava, tierra, lodo
Tipo de tracción	Ruedas
Altura de obstáculos	15 cm max.

El desarrollo de este tipo de vehículos por lo general ha estado enfocado a tareas o posibles misiones fuera de nuestro planeta. Así, por ejemplo, en [1] se describe un

JUAN CAMILO HERNÁNDEZ

Ingeniero mecatrónica, M.Sc.
Investigador Grupo DaVinci
Universidad Militar Nueva Granada
juankmilo8405@gmail.com

CRHISTIAN CAMILO SEGURA

Ingeniero mecatrónica, M.Sc.
Investigador Grupo DaVinci
Universidad Militar Nueva Granada
crhristian.segura@unimilitar.edu.co

MAURICIO MAULEDOUX Ph.D.

Investigador Grupo DaVinci
Profesor tiempo completo
Universidad Militar Nueva Granada
mauricio.mauledoux@unimilitar.edu.co

ÓSCAR F. AVILÉS Ph.D.

Líder Grupo DaVinci
Profesor titular
Universidad Militar Nueva Granada
oscar.aviles@unimilitar.edu.co

algoritmo que permite guiar de forma acertada a un vehículo terrestre no tripulado; en [2] se hace un análisis de vehículos movidos por orugas y de cómo interaccionan ellas al superar escaleras con un brazo manipulador; en [3] se presenta el desarrollo de un nuevo sistema de tracción por orugas pero de sección transversal circular; en [4], P. Fiorini realiza una comparación experimental de diversos robots de tracción por ruedas para la exploración planetaria, con el objeto de argumentar a favor del uso de este tipo de tracción; en [5] se diseña un algoritmo para el seguimiento de trayectorias, por medio de una herramienta computacional interactiva, con miras a la planificación y el seguimiento de trayectorias en teleoperación, con destino principal a Marte, como ocurre con los proyectos enfocados a tareas de exploración de los vehículos Mars Rover; en [6], varios investigadores de Caltech hacen una disertación acerca de los cambios que han sufrido los Mars Explorer Rover (MER) y los Mars Science Laboratory (MSL); en [7] se presenta un método para la estimación del comportamiento de un robot de ruedas ante los cambios del terreno; en tanto que en [8] se hace una revisión de diferentes configuraciones mecánicas de robots para superficies extraterrestres (figura 1)



Figura 1. Familia de los Mars Rover [6].

2. DISEÑO MECÁNICO

Durante los últimos 4 años, el grupo de investigación DaVinci ha recorrido un camino de búsqueda de información y ha desarrollado tres plataformas móviles controladas remotamente, que han tenido la finalidad específica de neutralizar y manipular objetos explosivos [9]. No obstante, la información que posee el grupo puede ser aplicada al desarrollo de robots móviles con otro tipo de funciones, como labores de minería, agricultura o exploración.

2.1. Selección de actuadores

Para cumplir con los parámetros expuestos en la tabla 1, y que son los elementos de entrada para el diseño de ingeniería, se procede a realizar los cálculos que permiten la selección de las partes mecánicas que constituirán al vehículo, como se muestra a continuación.

Como anticipo al análisis, presentamos en la figura 2 el diseño propuesto, que cumple con las características descritas en la tabla 2; se trata de un vehículo de seis

ruedas con tracción en cada una de ellas y con cambio de dirección en cada una.



Figura 2. Diseño ACM1PT.

El sistema de tracción lo componen seis motores tipo *hub*, cada uno de 400W¹. El procedimiento para la toma de decisiones acerca de estos motores se describe a continuación.

Tabla 2. Características de diseño

Descripción	Parámetros
Carga útil	300 kg
Dimensiones	1,90 (largo) x 0,90 (ancho) x 0,80 m (alto)
Tipo de tracción	6 ruedas con suspensión pasiva
Tipo de control	Inalámbrico vía Wifi o Bluetooth
Fuente de energía	Eléctrica - Actuadores eléctricos

Para obtener la fuerza de empuje necesaria se debe considerar el coeficiente de rodadura, partiendo del diagrama de la figura 3 y teniendo como fórmula para calcular dicho coeficiente² la siguiente:

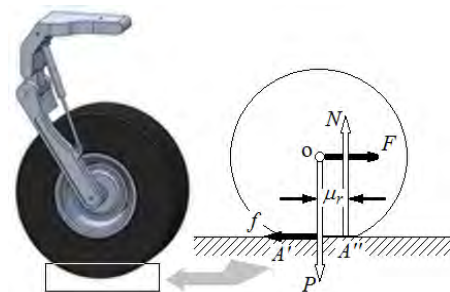


Figura 3. Rodadura de un cilindro deformable sobre un pavimento indeformable

$$F_E = C_{rr} \cdot N = 0,06 \cdot \frac{500}{6} \cdot 9,81 = 49 \quad (1)$$

¹<http://www.goldenmotor.com/magicpie/MP-performance%20curve%2024V.pdf>

²http://es.wikipedia.org/wiki/Resistencia_a_la_rodadura

donde F_E es la fuerza de empuje necesaria para generar movimiento, C_{rr} es el coeficiente de rodadura² y N la normal que se ejerce sobre cada rueda.

Para hallar el torque requerido que debe suministrar el motor, se multiplica F_E por el radio r de la rueda:

$$\tau = F_E \cdot r = 49 \cdot 0,27 = 13,23 \text{ Nm} \quad (2)$$

El resultado de (2) nos conduce a la selección de los motores tipo *hub* de 400 W.

Para la dirección del vehículo se propuso un sistema en el que cada rueda pueda rotar/pivotar en el eje Y (figura 4), y en el que cada una tenga su respectiva suspensión acoplada a un mono-brazo.

Los cálculos para el dimensionamiento de los actuadores parten de las fuerzas de rozamiento, que están fuertemente relacionadas con el peso del vehículo y con la carga neta que va a soportar.

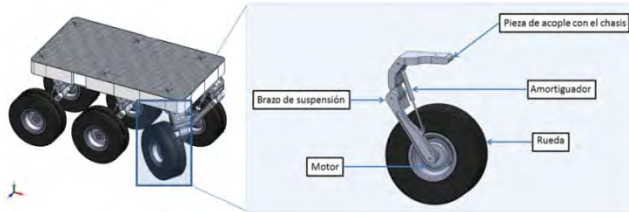


Figura 4. Sistema de mono-brazo y suspensión

Para seleccionar los actuadores que permiten la dirección del vehículo se efectúan los siguientes cálculos, bajo los supuestos de diseño de un peso total de 500 kg y un coeficiente de fricción μ de 0,7. El valor seleccionado para el coeficiente de fricción parte de los siguientes cálculos³:

$$F_r = \mu \cdot N = 0,8 \cdot \frac{500}{6} \cdot 9,81 = 654 \text{ N} \quad (3)$$

$$\tau = F_r \cdot r = 654 \cdot 0,07 = 45,78 \text{ Nm} \quad (4)$$

Los anteriores resultados nos conducen a la selección del servomotor M54-60-S250-R⁴ en conjunto con el reductor NORD: SK1 SI50 con relación 5:1, con el objeto de lograr la rotación en cada una de las ruedas en la condición crítica de carga máxima y con el vehículo detenido.

2.2. Selección de amortiguadores

Con el fin de cumplir con los objetivos de carga útil (Tabla 2) para el que fue diseñado el vehículo robótico, se implementa un sistema de suspensión pasivo. Se realiza una serie de simulaciones para verificar el

comportamiento del modelo del sistema dinámico [10] [11] [12] (véase figura 5).

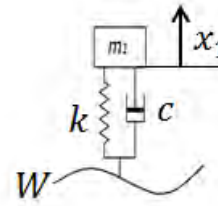


Figura 5. Modelo simplificado de la suspensión

En la figura 5, w es la perturbación al sistema, k la constante de rigidez del resorte, c la constante de amortiguación, m_1 es la masa del vehículo y x_1 es el desplazamiento vertical del vehículo.

El modelo matemático para este sistema es el siguiente:

$$m_1 \ddot{x}_1 = (w - x_1)k + (\dot{w} - \dot{x}_1)c \quad (5)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 = wk - x_1 k + \dot{w} c - \dot{x}_1 c \quad (6)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 + \dot{x}_1 c + x_1 k = wk + \dot{w} c \quad (7)$$

$$\ddot{x}_1 + \dot{x}_1 \frac{c}{m_1} + x_1 \frac{k}{m_1} = w \frac{k}{m_1} + \dot{w} \frac{c}{m_1} \quad (8)$$

$$\frac{X(s)}{W(s)} = \frac{\frac{c}{m_1} s + \frac{k}{m_1}}{s^2 + \frac{c}{m_1} s + \frac{k}{m_1}} \quad (9)$$

Igualando el denominador $w(s)$ de la función a la ecuación característica de un sistema de segundo orden, se pueden hallar las constantes de amortiguamiento y la constante de rigidez del resorte, en función de la frecuencia natural del sistema ω_n y del factor de amortiguamiento ζ .

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = s^2 + \frac{c}{m_1} s + \frac{k}{m_1} \quad (10)$$

Bajo la suposición que hicimos para el cálculo de los motores, la masa total del vehículo robótico es de 500 kg y por ello se asigna este valor para m_1 . Se toma como parámetro de diseño del sistema dinámico una frecuencia natural de 30 rad/s y se varía el valor para ζ , con lo que se obtiene como resultado los valores de las constantes de amortiguamiento y la constante para el resorte; estas se ingresan para efectuar las simulaciones en la herramienta computacional SolidWorks® con el complemento SolidWorks Motion para poder así efectuar un análisis de movimiento. Se realizan simulaciones con las herramientas computacionales MatLab® y SolidWorks®, y se comparan los resultados obtenidos por los dos *software*, para la adquisición de los amortiguadores comerciales que mejor cumplan las constantes de las simulaciones (ver figura 6).

³ <http://www.causadirecta.com/especial/calculo-de-velocidades/tablas/tabla-de-factores-de-rozamiento-del-pavimento-para-neumaticos-de-goma>

⁴ http://www.robotis.com/xe/DynamixelPro_en

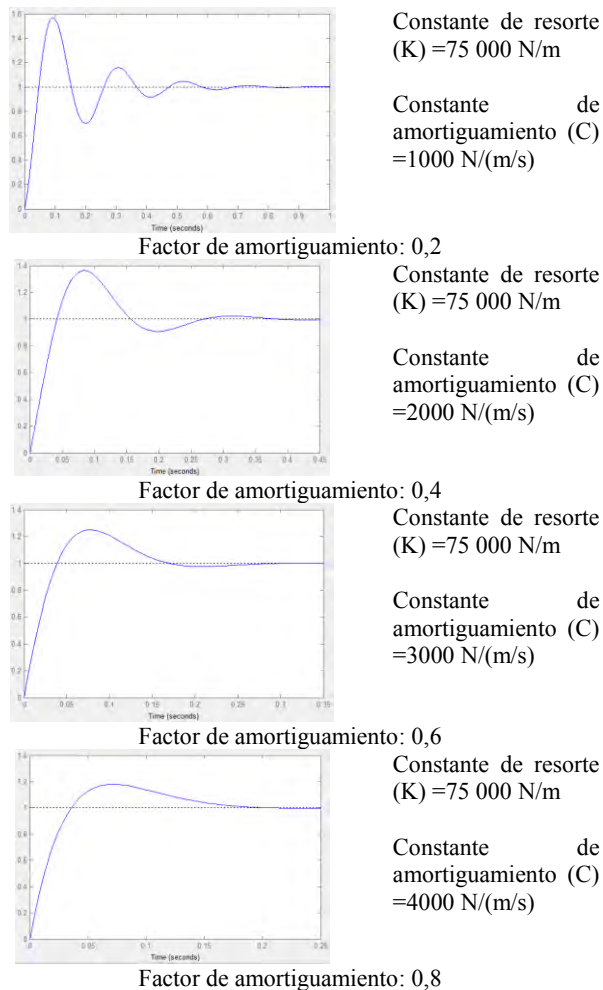


Figura 6. Diferentes tipos de respuesta para variaciones de ζ

3. CONCLUSIONES

El trabajo expuesto es una aproximación a la solución final, dado que el carro para minería todavía se encuentra en etapa de desarrollo. Sin embargo, toda la parte de selección de actuadores y sistema de suspensión está definida y está basada en los cálculos realizados para la elección de los elementos motrices.

Por otro lado, las dimensiones del vehículo están definidas, debido a la elección de las ruedas, las cuales ya se han adquirido.

Este proyecto pretende dar solución a un problema identificado y establecido, que disminuirá los índices de riesgo profesional en el sector minero.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Militar Nueva Granada por el apoyo al proyecto ING 1571, para el

desarrollo de la investigación en robótica móvil para exploración minera.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Weatherly, M. Khalili, R. Bolling, K. Ring, B. Grabowski, K. Forbes, C. Cicalese, "Heading prediction in unmanned ground vehicles by laser compass", *2010 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, 2010.
- [2] Y. Liu y G. Liu, "Track-stair and vehicle-manipulator interaction analysis for tracked mobile manipulators climbing stairs", *4th. IEEE Conference on Automation Science and Engineering*, 2008.
- [3] K. Tadakuma, R. Tadakuma, K. Nagatani, K. Yoshida, A. Ming, M. Shimojo, K. Iagnemma, "Tracked vehicle with circular cross-section to realize sideways motion", *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009. IROS 2009, IEEE/RSJ, 2009, pp. 1679-1684.
- [4] P. Fiorini, "Ground mobility systems for planetary exploration", *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation, San Francisco, CA, April 2000*, 2000.
- [5] D. Liu, W. Wang, Y. Li, Zh. Bo, "A human-computer interaction based path planning method for mobile robots in a complex environment", *2011 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Integrated Systems (ICISS), Conference Anthology, IEEE*, pp. 1-6.
- [6] "Autonomy for Mars Rovers: Past, Present, and Future", *Computer*, vol. 41, n° 12, pp. 44-50, 2008.
- [7] K. Iagnemma, K. Shinwoo, H. Shibly, y S. Dubowsky, "Online terrain parameter estimation for wheeled mobile robots with application to planetary rovers", *IEEE Transactions on Robotics*, 2004.
- [8] A. Seeni, B. Schafer, B. Rebele, N. Tolyarenko, "Robot mobility concepts for extraterrestrial surface exploration" Wessling German Aersp. Center, *Aerospace Conference, 2008 IEEE*, pp. 1-14.
- [9] O. García, L. Solaque, O. Avilés, y P. Niño, "Hardware and software architecture of a mobile robot with anthropomorphic arm", *Andescon, 2010 IEEE*, 2010.
- [10] Chi-Tsong Chen, *Analog and Digital Control System Design*. Oxford University Press, 2006.
- [11] K. Ogata, *Dinámica de sistemas*, Prentice Hall Hispanoamericana, México, 1987.
- [12] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, Pearson-Prentice Hall, Madrid, 2003.
- [13] A. Seeni, B. Schäfer y G. Hirzinger, *Aerospace Technologies Advancements*, T. T. Arif (Ed.), InTech, January 2010.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ARREGLO HELICOIDAL MASIVO DE TRANSDUCTORES MURATA MA40S4S A 40 KHz

Design and construction of a massive helical Murata MA40S4S transducer array at 40 kHz

RESUMEN

En este artículo se presenta el diseño y construcción de un arreglo helicoidal masivo de 390 transductores operando a 40 kHz, para generar vórtices acústicos. Para su construcción se realizó un análisis estadístico de frecuencia, fase y directividad de los elementos utilizados. También se diseñó un sustrato helicoidal para posicionar espacialmente cada transductor, y un circuito electrónico para la excitación de cada uno de ellos. Por último, se presenta el primer prototipo terminado y los resultados de caracterización del mismo.

Palabras clave: frente de onda helicoidal, ultrasonidos, vórtice acústico.

ABSTRACT

This article presents the design and construction of a massive helical transducer array of 390 transducers (40 kHz), to generate acoustic vortices. To accomplish this task, the frequency response, phase and directivity of the array elements were statistically analyzed. A helical substrate was designed to properly locate the transducers, and an electronic circuit for excitation of each transducer was implemented. The characterization results of the first prototype are included.

Keywords: acoustic vortex, helical wavefront, ultrasound.

1. INTRODUCCIÓN

Se conoce como sistema *phased array* al conjunto de tecnologías, incluyendo la de los transductores, que permiten generar ondas ultrasónicas con la capacidad de enfocar y dirigir el haz acústico por medio de desfases temporales a cada uno de los elementos activos que lo componen [1].

Estos *phased arrays* emplean el principio físico de fases de las ondas, para generar una salida independiente para cada elemento. La superposición de los aportes de cada uno de los elementos compone un frente de onda en una dirección determinada y focaliza así toda la energía en un punto dado [2]. Estos dispositivos son utilizados en múltiples aplicaciones [3], [4] y pueden presentar diferentes configuraciones [5], [6]. Con la configuración y retardos apropiados, los *phased arrays* pueden ser empleados para la generación de frentes de ondas helicoidales, conocidos comúnmente como vórtices acústicos (VA). Por lo general, los arreglos con múltiples transductores están instalados en una superficie plana, para garantizar que todos los elementos se encuentren a la misma altura, y en ellos el retardo es generado temporalmente. Sin embargo, si los elementos no se encuentran a la misma altura, sino que siguen un patrón, como la forma de un tornillo en el caso de un helicoide, entonces el desfase ya no sería temporal sino espacial. De aquí se plantea que un arreglo de transductores desfasados espacialmente induciría la generación de frentes de ondas helicoidales. En la actualidad, no se ha

RUBÉN DARÍO MUELAS

Ingeniero electrónico
Universidad del Valle
ruben.muelas@correounivalle.edu.co

JHON FERNANDO PAZOS

Ingeniero mecánico
Universidad del Valle
jhon.f.pazos@correounivalle.edu.co

JOAO EALO CUELLO

Ingeniero mecánico, Ph.D.
Universidad del Valle
joao.ealo@correounivalle.edu.co

reportado en la literatura el desarrollo de este tipo de multitransductores para la generación de VA a partir de desfases espaciales.

Los vórtices ultrasónicos son campos acústicos que poseen un frente de onda con forma helicoidal. Estos frentes se caracterizan por poseer una distribución de amplitud anular, donde la presión en el centro es cercana a cero; además, su fase se comporta como una rampa espiral que gira en torno a una singularidad en la que no es posible determinar un valor de fase y la amplitud se desvanece (núcleo del vórtice). La fase del campo circula alrededor de dicha singularidad y varía $2\pi m$ sobre un circuito cerrado en un plano transversal, en el que m es la carga topológica, la cual indica el número de revoluciones efectuado por el frente helicoidal en una longitud de onda. Los VA –haces helicoidales– poseen características que los hacen especialmente atractivos, como las de reconstruirse ante obstrucciones parciales, transportar momento angular en su distribución espacial y poseer un nulo de presión a lo largo del eje principal de propagación.

Los vórtices han demostrado gran potencial de aplicación en la transmisión robusta de información digitalizada [7] y en control de partículas atómicas [8], [9]; en aplicaciones recientes en comunicaciones se ha mostrado que es posible codificar varios canales a la misma frecuencia con vórtices que utilicen ondas de radio [10]. Este nuevo método se ha encontrado útil en diferentes

campos y aplicaciones, como en la astronomía y ciencias del espacio [11], [12], detección de planetas extrasolares [13] y huecos negros de Kerr [14], radares [15], nanotecnología [16] y experimentos cuánticos [17],[18]. Aunque la mayor parte de las investigaciones realizadas en torno a los vórtices se ha llevado a cabo en el campo de la óptica, las ecuaciones que describen el fenómeno son equivalentes, ya sean estos ópticos, acústicos o cuánticos; por lo tanto, este método puede ser empleado con los frentes de ondas ultrasónicas con el fin de generar VA.

En este artículo se presenta el diseño y construcción de un arreglo helicoidal masivo de transductores a 40 kHz, compuesto de 390 elementos, desarrollado en el Laboratorio de Vibraciones y Acústica (LaVA) de la Universidad del Valle, y con él se muestra que es posible generar vórtices acústicos a través de desfases físicos, sin necesidad de utilizar un *phased array*. Este artículo está dividido en seis partes: en la primera se muestran los materiales y métodos para la caracterización del dispositivo presentado en la sección 2. Seguidamente se presenta el análisis estadístico de frecuencia, fases y directividad de los transductores, que se describe en la sección 3. En la sección 4 se presenta el diseño del sustrato y del circuito electrónico para la alimentación de los 390 transductores. En la sección 5 se muestran los resultados obtenidos tanto del diseño del multitransductor como del campo acústico generado, y por último, en la sección 6 se presentan las conclusiones y los trabajos futuros.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la caracterización de transductores se emplearon dos configuraciones experimentales. En la primera se empleó un micrófono de $\frac{1}{4}$ de pulgada con la cara enfrentada al transductor, ubicado a una distancia d (Figura 1). En la segunda configuración, además del micrófono, se utilizó una unidad de rotación. Se fijó el transductor en el centro de la unidad a una distancia l del micrófono, y el micrófono se instaló en el extremo de la unidad de rotación, con el fin de que siguiera una trayectoria circular de radio l , como se muestra en la Figura 2. En ambas configuraciones se empleó una señal de excitación tipo chirp sinusoidal inventanada, con un rango de frecuencias entre los 10 kHz y 80 kHz, y una amplitud de 10 Vpp.

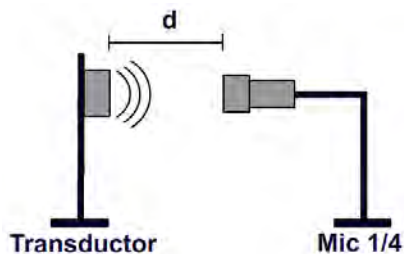


Figura 1. Configuración utilizada para la medición del campo acústico de los transductores.

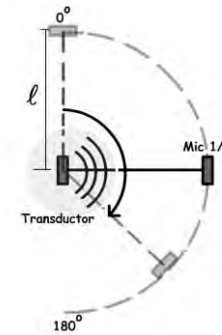


Figura 2. Configuración utilizada para la medición de directividad de los transductores.

Para la caracterización del multitransductor, se empleó el mismo esquema que se presentó en la Figura 1, con una distancia d de 1,8 m, y una señal continua de 40 kHz.

3. CARACTERIZACIÓN DE TRANSDUCTORES

Para el diseño e implementación del arreglo de transductores fue necesario garantizar que todos los transductores funcionaran adecuadamente. Con el fin de verificar su condición se realizaron tres análisis independientes: respuesta en frecuencia, fase y directividad.

3.1. Análisis de respuesta en frecuencia

De los 390 transductores disponibles se seleccionó aleatoriamente una muestra de 50. Cada transductor se ubicó en la misma posición, enfrentado al micrófono, como se muestra en la Figura 1, pero garantizando que la distancia entre el micrófono y transductor se conservara para cada medición. La distancia entre el transductor y el micrófono fue de 18 cm aproximadamente.

Con la frecuencia de resonancia de cada transductor se construyó un histograma de frecuencias, como se presenta en la Figura 3. La gráfica describe aproximadamente una distribución normal, con una media de 40,89 kHz y una desviación estándar de 0,04 kHz, lo cual indica que la variación entre transductores es baja, algo necesario para la conformación adecuada del VA. De acuerdo con los datos del fabricante [19], la frecuencia de resonancia es de 40 kHz.

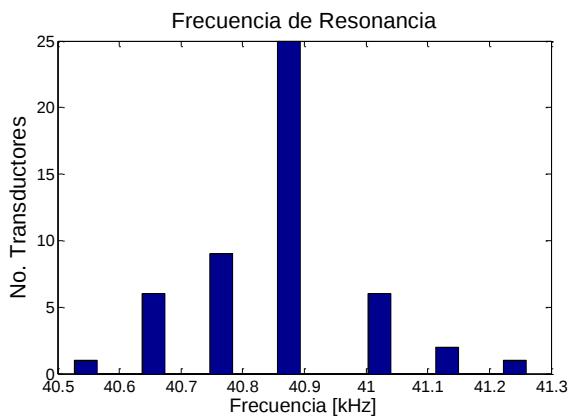


Figura 3. Histograma de frecuencia de resonancias de la muestra de 50 transductores seleccionados aleatoriamente.

También se obtuvo la función de transferencia promedio, con el fin de hallar la sensibilidad promedio de los 50 transductores (Figura 4). Para un rango de frecuencias entre 39,9 kHz y 41,8 kHz, se encontró que oscilan entre 1,6 y 2,8 Pa/V. Esto indica que si un transductor es excitado en onda continua con 10V, la presión esperada oscilaría entre los 16 y 28 pascales a 18 cm.

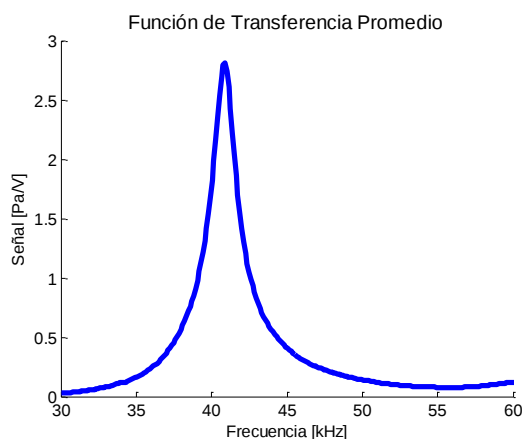


Figura 4. Función de transferencia promedio para 50 transductores.

3.2. Análisis de fases

Este análisis se realizó con el propósito de garantizar que los desfases de cada uno de los transductores del multitransductor se deban a la geometría helicoidal del sustrato y no a los desfases independientes de cada uno de ellos. Para este análisis se seleccionó una muestra de 100 transductores, de los cuales se utilizó uno como referencia. Las mediciones realizadas siguen el esquema mostrado en la Figura 1, con una distancia d de 10 cm aproximadamente, y una excitación sinusoidal a 40 kHz. Para esta configuración se garantizó la adecuada polarización de cada uno de los transductores. Los desfases de los 99 transductores restantes se midieron respecto al transductor de referencia. Las mediciones

obtenidas se presentan en la Figura 5. La distribución de desfases no es normal; por lo tanto, no es posible obtener un valor de media y desviación estándar. Sin embargo, de los 100 transductores seleccionados, el 86% presenta un desfase entre 0 y 15 grados, lo cual es un valor aceptable para garantizar la conformación del vórtice acústico.

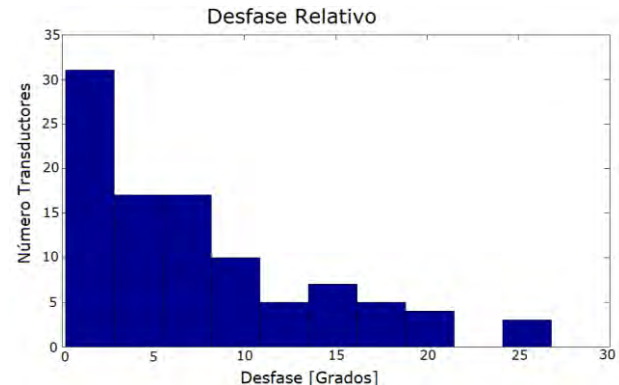


Figura 5. Histograma de desfases de la muestra de 100 transductores seleccionados aleatoriamente.

3.3. Análisis de directividad

La misma muestra de 50 transductores seleccionada para el análisis de frecuencias fue empleada para la directividad. Cada transductor se ubicó aproximadamente a 18 cm del micrófono. El micrófono se ubicó sobre la unidad de rotación y se desplazó angularmente desde 0° hasta 180° en torno al transductor, el cual estaba localizado en el centro de la trayectoria (Figura 2). El paso angular fue de aproximadamente 1 grado. Este procedimiento se realizó para cada transductor.

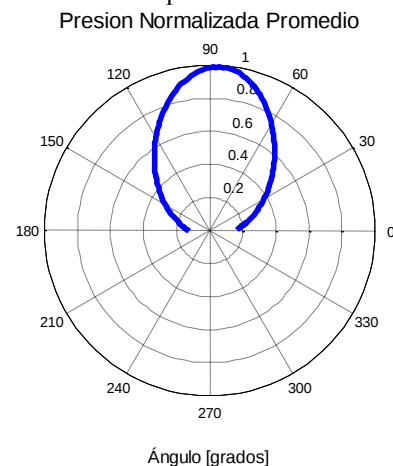


Figura 6. Presión normalizada de la directividad a -6dB para un transductor.

En la Figura 6 se presenta la gráfica de directividad normalizada promedio de los 50 transductores. Igualmente se presenta el histograma de directividad de la muestra de 50 transductores (Figura 7). En esta gráfica se puede observar que el 88% de los transductores

presenta una directividad entre 83 y 95 grados, medidos a -6 dB.

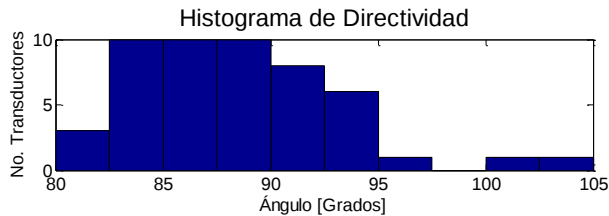


Figura 7. Histograma de directividades de la muestra de 50 transductores seleccionados aleatoriamente.

4. DISEÑO DEL SUSTRATO Y DEL CIRCUITO ELECTRÓNICO DE ALIMENTACIÓN

Para localizar y excitar cada uno de los transductores fue necesario construir un sustrato helicoidal y un circuito de alimentación, respectivamente.

4.1. Diseño del sustrato para el multitransductor

El sustrato helicoidal se diseñó para ubicar los 390 transductores a diferentes alturas, con el fin de conformar una superficie helicoidal discreta. La idea es que el dispositivo genere un VA de alta intensidad, sin la necesidad de emplear un sistema *phased array*. Se partió del supuesto que si un *phased array* puede generar un vórtice acústico mediante el desfase temporal de las señales de cada uno de los transductores, entonces un desfase espacial en toda la superficie podría generar este desfase temporal.

El sustrato consiste básicamente en una pieza con la parte inferior plana y la superior en forma de helicoide. Sobre la superficie helicoidal se realizaron agujeros de diferentes profundidades, para poder colocar correctamente los transductores, de forma que estos adopten la forma del sustrato. Los agujeros son equidistantes y están separados 11 mm entre centros. La profundidad de cada agujero se calculó con base en su posición angular sobre el plano horizontal, en la carga topológica requerida para el vórtice (en este caso $m=1$) y la frecuencia de operación. El sustrato se construyó en un centro de mecanizado CNC sobre una placa de polietileno de alta densidad (Empack). La Figura 8 muestra el modelo CAD del sustrato diseñado y el ensamble del sustrato y transductores.

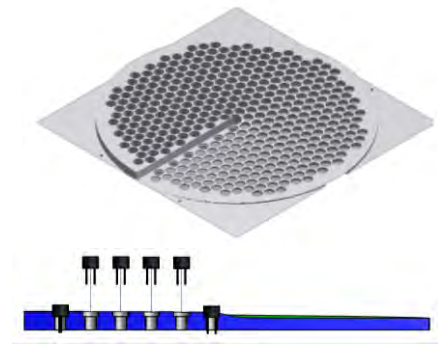


Figura 8. Modelo CAD del sustrato diseñado (arriba). Ilustración del ensamble del sustrato y transductores (abajo).

4.2. Diseño del circuito electrónico de alimentación

Para la excitación de un solo transductor se utilizaron 2 compuertas 4049B. Estas compuertas están conectadas en paralelo con el fin de suministrar la corriente necesaria al transductor. La entrada de las compuertas está determinada por las señales que suministre el generador de señales cuadradas, y la salida está conectada directamente al transductor.

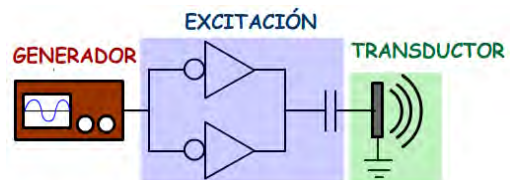


Figura 9. Circuito de excitación de un transductor.

Al medir experimentalmente la corriente que consume cada transductor al alimentar el circuito con una señal cuadrada de 10 V_{pp}, se encontró que cada uno de ellos consume entre 3 y 4 mA.

Para poder excitar 390 transductores, se aplicó el concepto de circuitos CMOS en cascada, con el fin de tener una sola entrada y múltiples salidas que presenten excitación sincronizada. De acuerdo con la hoja de datos del fabricante del circuito integrado 4049B, a cada compuerta se le puede conectar un máximo de 16 compuertas CMOS, que corresponden a 8 transductores, ya que con dos compuertas *buffer* inversoras se puede excitar un transductor. En la Figura 10 se muestra el esquema del circuito de alimentación, que consta de tres etapas. La etapa I se encarga de recibir la señal del generador y enviarla a cada uno de los circuitos integrados. Esta etapa utiliza 4 compuertas. La etapa II se encarga de recibir la señal de la etapa I y enviarla de manera sincronizada a la etapa III. Para su implementación se emplearon 49 compuertas. Por último, la etapa III se encarga de excitar a cada uno de los transductores y para ello se utilizaron 780 compuertas.

Ya que cada integrado consta de 6 compuertas, en total se emplearon 140 integrados 4049B.

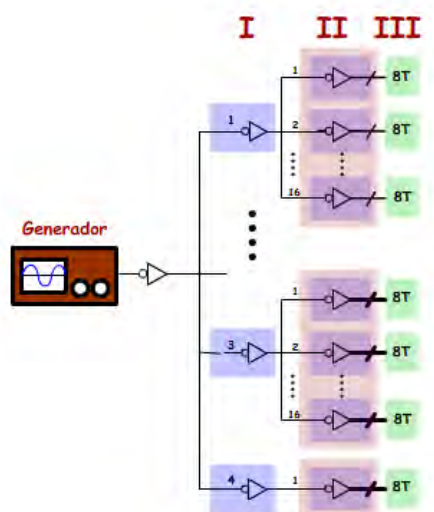


Figura 10. Etapas para el circuito de excitación del multitransductor con 390 transductores.

5. RESULTADOS

En la Figura 11 se muestra la imagen, ya construido, del multitransductor con sustrato helicoidal.



Figura 11. Multitransductor con sustrato helicoidal, una vez construido.

Con el fin de corroborar que el multitransductor está generando un vórtice acústico, se midió el campo de presión acústica sobre un plano transversal (perpendicular al eje acústico). En la Figura 12 se observa la distribución de la presión acústica obtenida experimentalmente en tres instantes de tiempo diferentes. Se observa cómo las zonas de sobrepresión y depresión van rotando alrededor del centro del plano. En la Figura 13 se muestra el mismo campo de presión pero en el dominio de la frecuencia. En la parte izquierda de la figura se presenta la magnitud del campo de presiones, y se alcanza a observar un anillo de presión con un nulo en el centro del plano. A la derecha de la figura se encuentra la fase, donde se observan la singularidad hacia el centro del plano y las líneas espirales de fase constante. Estos resultados presentan una forma similar a los reportados en [6]. También se puede observar que la fase varía en múltiplos de 2π alrededor de la singularidad. Con estas

pruebas se demuestra que es posible generar vórtices empleando el multitransductor diseñado.

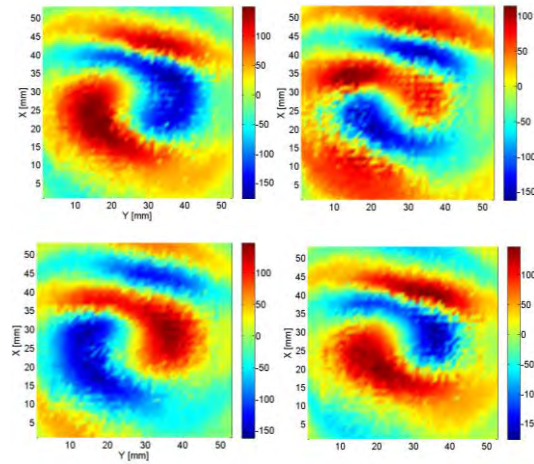


Figura 12. Distribución de presión en cuatro instantes de tiempo para un vórtice medido experimentalmente. Frecuencia $f=40,1$ kHz.

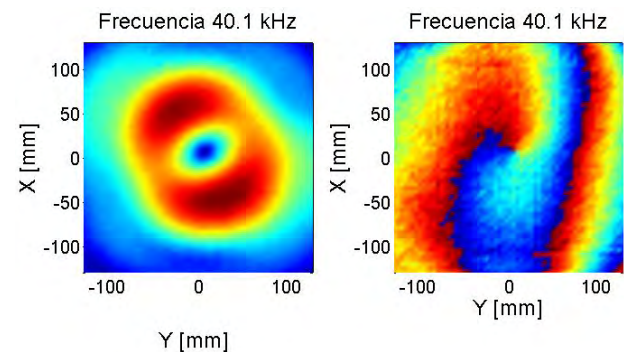


Figura 13. Distribución de amplitud (izquierda) y fase (derecha) del campo de presión acústica, medido en el dominio de la frecuencia para un vórtice acústico. Frecuencia $f=40$ kHz.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se demostró que con el sustrato helicoidal, y garantizando desfases espaciales pequeños entre transductores, es posible generar vórtices acústicos. Esto representa una ventaja en costos respecto a los sistemas *phased array* convencionales, ya que no es necesario emplear la onerosa electrónica de retardos.

Con el dispositivo construido se logró generar un vórtice acústico con una presión máxima de 150 Pa y un nivel de presión sonora de 137 dB.

No obstante, a pesar de que se consiguió la formación de un vórtice, su estructura no presenta la calidad esperada, debido probablemente a errores en la posición de los transductores, derivados de la fabricación y ensamble del sustrato, y a una posible distribución irregular de sensibilidad en transmisión. Se plantea como trabajo

futuro la verificación de la posición de cada transductor y su sensibilidad.

También como trabajo futuro, se propone evaluar y cuantificar el nivel de intensidad que genera el dispositivo, así como estimar cuál sería la intensidad necesaria para aplicaciones de manipulación de partículas.

7. BIBLIOGRAFÍA

Referencias de publicaciones periódicas:

- [1] D. R. Raichel. "The science and applications of acoustics". *AIP series in modern acoustics and signal processing*. Springer. ISBN-10: 0-387-26062-5.
- [2] P. D. Wilcox, C. Holmes, y B. W. Drinkwater. "Advanced reflector characterization with ultrasonic phased arrays in NDE applications". *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. Vol. 54, No 8, pp. 1541-1550, August 2007.
- [3] I. Takayuki, M. Tatezono, y H. Shinoda. "Non-contact method for producing tactile sensation using airborne ultrasound". Department of Information Physics and Computing. The University of Tokyo. Tokyo, Japan. 2008
- [4] K. Yokohama, K. Nakatsuma, M. Fujiware, M. Takahashi, y H. Shinoda. "Remote compliance measurement method using ultrasound phased array". *SICE Annual Conference*. Sep 13-18. Waseda University, Tokyo, Japan. ISBN: 0001/11/0000-2397.
- [5] A. Vaziri, G. Weihs, y A. Zeilinger, "Superpositions of the orbital angular momentum for applications in quantum experiments", *Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics*, vol. 4, Number, 2, pp. S47-S51, Feb. 2002.
- [6] J. Ealo, "Transductores basados en ferroelectretos para aplicaciones ultrasónicas en aire", Tesis de Ph.D., Universidad Politécnica de Madrid, 2009.
- [7] M. Berry, "Much ado about nothing: optical distortion lines (phase singularities, zeros and vortices)", *Conference on Singular Optics*, vol. 3487, 1998.
- [8] G. Gibson, J. Courtial, M. Padgett, M. Vasnetsov, V. Pas'ko, S. Barnett, y S. Franke-Arnold, "Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum", *Optics Express*, vol. 12, pp. 5448-5456, Nov. 2004.
- [9] T. Kuga, Y. Torii, N. Shiokawa, T. Hirano, Y. Shimizu, y H. Sasada, "Novel optical trap of atoms with a doughnut beam", *Physical Review Letters*, vol. 78, pp. 4713-4716, June 1997.
- [10] F. Tamburini, E. Mari, A. Sponselli, B. Thidé, A. Bianchini, y F. Romanato, "Encoding many channels

through radio vorticity: First experimental test". *New Journal of Physics*, Vol. 14, pp. 1-17, March 2012.

- [11] C. Demore, Z. Yang, A. Volovick, H. Wang, S. Cochran, M. MacDonald, y G. Spalding, "A sonic screwdriver: Acoustic angular momentum transfer for ultrasonic manipulation", *2011 IEEE International Ultrasonics Symposium*, pp. 180-183, Oct. 2011.
- [12] K. Volke-Sepúlveda, A. Santillán, y R. Boullosa, "Transfer of angular momentum to matter from acoustical vortices in free space", *Physical Review Letters*, vol. 100, pp. 2-5, Jan. 2008.
- [13] G. Anzolin, F. Tamburini, A. Bianchini, G. Umbriaco, y C. Barbieri. "Optical vortices with starlight", *Astronomy and Astrophysics*, vol. 484, Number 3, pp. 1159-1165, Sept. 2008.
- [14] B. Thidé, J. Then, J. Sjöhol, K. Palmer, J. Bergman, T. D. Carozzi, N. Istomin, N. H. Ibragimov, y R. Khamitova, "Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain", *APS Physics*, vol. 99, issue 8, Aug. 2007.
- [15] J.H. Lee, G. Foo, E.G. Johnson, and G.A. Swartzlander, "Experimental verification of an optical vortex coronagraph", *Optics Express*, vol. 16, Issue 14, p. 053901, July 2008.
- [16] F. Tamburini, B. Thidé, G. M. Terriza, y G. Anzolini, "Twisting of light around rotating black holes", *Nature Physics*, vol. 7, pp. 195-197, February 2011.
- [17] D. M. Palacios, I. D. Maleev, A. S. Marathay, y G. A. Swartzlander, "Spatial correlation singularity of a vortex field", *Physical Review Letters*, vol. 92, Issue 14, p.143905, Apr. 2004.
- [18] D.G. Grier, "A revolution in optical manipulation" *Nature*, vol. 424, pp. 810-816, Aug. 2003.

Reportes Técnicos:

- [19] Ultrasonic Sensor, "Application Manual", Murata Manufacturing Co., Ltd. Cat. No. S15E-5, pp. 5-6.

ESTRATEGIA PARA LA AUTO RECONFIGURACIÓN PARA EL SISTEMA ROBÓTICO MODULAR - MECABOT.

Strategy for Self – Configuration for the Modular System Robot – Mecabot.

RESUMEN

En este trabajo se expondrá de brevemente el contexto de la robótica modular actual, llegando hasta la descripción del sistema robótica modular propuesto Mecabot y así empezar a desarrollar el objetivo que este trabajo propone, el cual es el desarrollo de una estrategia para la autorreconfiguración de robots modulares. Para ello se muestran los diferentes aspectos importantes para realizar la estrategia como: la comunicación, los algoritmos de control de los módulos, etc. La estrategia se valida en el software WEBOTS y se demuestra que la estrategia funciona correctamente con posibilidad de ser adaptable a nuevas tareas.

Palabras clave: autorreconfiguración, máquina de estados finitos, lógica difusa, robots modulares, robots móviles, sistemas multirrobot.

ABSTRACT

In this work will be discussed briefly the context of the current modular robotics, reaching the description of the proposed modular robotic system - MECABOT and to start to develop this work proposes objective, which is to develop a strategy for self-reconfiguration of modular robots. To do the different aspects is important to deliver the strategy such as communication, control algorithms for robots, etc. The strategy is validated on the Webots software and shows that the strategy works correctly with the possibility of being adaptable to new tasks.

Keywords: Finite state machine, fuzzy logic, mobile robots, modular robots, multi-robot systems, self-reconfiguration.

ÓSCAR RUBIANO

Ingeniero mecatrónico y asistente de investigación
Grupo de investigación DAVINCI
Universidad Militar Nueva Granada
oscar.rubiano@ieee.org

RICARDO CASTILLO

Magíster en Ingeniería Mecánica
Docente investigador
Grupo de investigación DAVINCI
Universidad Militar Nueva Granada
ricardo.castillo@unimilitar.edu.co

CAMILO HURTADO

Ingeniero mecatrónico y asistente de investigación
Grupo de investigación DAVINCI
Universidad Militar Nueva Granada
camiloandresh@ieee.org

JUAN CELY

Ingeniero mecatrónico, graduando.
Grupo de investigación DAVINCI
Universidad Militar Nueva Granada
u1801260@unimilitar.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La robótica modular es una aplicación de la ingeniería en mecatrónica la cual está enfocada en el diseño de robots constituidos por partes simples que pueden ser ensamblados con otros módulos con iguales o similares características, con el fin de conformar robots más complejos con la habilidad de hacer tareas específicas. El objetivo del proyecto consiste en la creación de una estrategia que permita la autorreconfiguración de un sistema robótico modular llamado MECABOT. Cada módulo forma parte de un sistema robótico que tiene la habilidad de ensamblarse a otros módulos con el objetivo de crear nuevas configuraciones robóticas que permitan diferentes tipos de locomoción, los cuales pueden ser utilizados para superar obstáculos en terrenos desconocidos y peligrosos, como los que están presentes en misiones de búsqueda y rescate, investigación de ambientes extraterrestres y subacuáticos, etc.

El robot modular Mecabot está compuesto de dos cubos unidos mecánicamente con una articulación en el medio que permite una rotación entre ellos. Cada cubo posee

una placa en un extremo, que cumple la función de una rueda diferencial, la cual permite al módulo realizar desplazamientos rápidos y grandes con una reorientación fácil. Además, cada cubo posee un pivote que permite al módulo la habilidad de desplazarse con movimientos corporales. Todas estas características hacen del módulo un sistema de cinco grados de libertad.

Cuando varios módulos se han ensamblado, ellos pueden tomar varias configuraciones de locomoción, entre las más comunes están: movimiento en forma de oruga, en la cual los pivotes de los módulos rotan en una dirección perpendicular respecto a la superficie por la cual se desplaza; con esta configuración el sistema se desplaza a lo largo de una línea recta; movimiento en forma de rueda, en la cual un mínimo de seis de módulos unidos en serie logran crear un tipo de rueda uniendo el primer y último módulo y por último el movimiento en forma de serpiente, en el que se usa la articulación central para cambiar los cubos de cabeceo (cabeceo a cabeceo) viraje se logra que algunos pivotes puedan rotar de forma perpendicular y otros de forma paralela a la superficie del movimiento.

La integración entre los movimientos individuales y los modos en ensamble son muy importantes y son el primer paso para tener en cuenta al empezar una estrategia para la autorreconfiguración. Para lograr esto, el control basado en inteligencia artificial tiene dos algoritmos de lógica difusa. El primer algoritmo permite la orientación de cada módulo y el segundo para la traslación de cada módulo hasta la distancia necesaria para crear el ensamble entre módulos. Además, estos algoritmos trabajan con una máquina de estados finitos que permite el comportamiento correcto del módulo y el tiempo apropiado en el que se ejecuta cada algoritmo de inteligencia artificial.

2. CONTENIDO

2.1 Trabajo relacionado

Un enfoque amplio que se puede dar a la robótica modular es la interpretación de los robots como si fueran sistemas multicelulares, característica que le brinda a los robots unas capacidades similares a un organismo multicelular, como una gran confiabilidad en el desempeño de las tareas, una gran capacidad de adaptación al medio ambiente y, si se analiza cuidadosamente, incluso un comportamiento evolutivo. Con este tipo de comportamiento, los sistemas robóticos podrían unir y/o separar módulos especializados, acorde a una necesidad específica, descartando los que están dañados y, compartir información y energía entre módulos. Mientras se aplique un control adecuado, los robots modulares son capaces de cambiar sus configuraciones para convertirse en diferentes estructuras o formas, por lo que se refieren a veces como autorrobots reconfigurables [1][2].

En 1994, cuando el ingeniero mecánico Mark Yim hizo su tesis doctoral en la Universidad de Stanford titulado "Polypod: locomoción con una unidad robótica modular reconfigurable", que introduce el concepto de la robótica modular reconfigurable, y una nueva taxonomía para la locomoción, dividido en locomoción estéticamente estable y, dinámicamente estable [3][4].

Según Mark Yim, la primera clasificación de los robots modulares pueden ser: tipo retículo, tipo cadena, y de tipo híbrido.

Los robots modulares de tipo retículo son los que se comportan como átomos, que pueden unirse o separarse para formar estructuras, y pueden cambiar de configuración y funcionalidad, aunque no pueden moverse. De acuerdo con el tipo de estructuras que crean, se clasifican en 2d y 3d.

Los robots modulares de tipo cadena están formados por la unión de módulos en secuencia, y los robots híbridos son aquellos que tienen características de los robots de

tipo retículo y tipo de cadena. Los robots de tipo cadena se clasifican en topologías de 1D, 2D y 3D. Las topologías 1D puede ser gusanos, serpientes, brazos, piernas, entre otros [5].

Los robots autorreconfigurables forman parte de un sistema de múltiples robots que pueden cambiar las estructuras que conforman al estar unidos. El cambio de la configuración física del sistema robótico permite adaptarse a su entorno, por ejemplo, cambiando de una configuración coche (el más adecuado para terreno plano) a una serpiente configuración adecuada para otros tipos de terreno [6].

Por ejemplo: el sistema Crystalline fue diseñado en el instituto Dartmouth que adoptó el método Melt-Grow de planificación distribuida para planificar el movimiento y la reconfiguración del robot [7]. El sistema robótico Molecule fue diseñado por Kotay en instituto Dartmouth que adoptó un modelo de tres niveles de programación: la planificación de ruta, planificación de la configuración y planificación de tareas[8]. El robot M-TRAN propuesto por Kurokawa en AIST puede realizar en reconfiguración en tres dimensiones, utilizando un planificador global y un esquema selector de movimiento [9]. Wei-min Shen en la Universidad del Sur de California investiga el robot autorreconfigurable SuperBot y sus múltiples patrones de movimiento[10].

2.2 Descripción del sistema robótico modular-mecabot

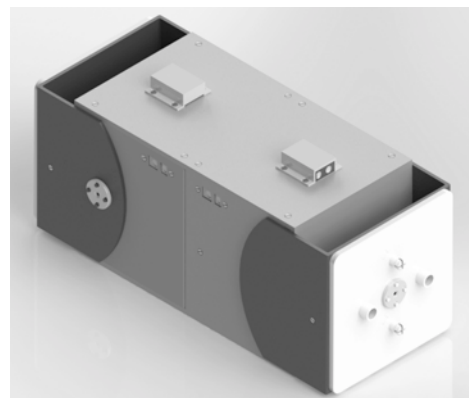


Figura 1 Representación del robot Mecabot.

El robot Mecabot representado en la Figura 1 es un sistema robótico modular, con forma de doble cubo con 5 grados de libertad. Dos articulaciones que se llaman pivotes presentes en cada media parte del módulo con un movimiento de rotación perpendicular al plano sobre el que se desplaza el robot. Cada mitad del módulo tiene una placa que aumenta la capacidad de desplazamiento que permite que el módulo posea la capacidad de un robot diferencial con ruedas. Las placas son independientes de las articulaciones de pivote. Finalmente se el último grado de libertad se encuentra presente en el centro del robot lo cual permite que el robot pueda cambiar su configuración individual de

cabeceo (cabeceo a cabeceo) viraje como se muestra en la Figura 2, la cual no es bastante relevante cuando el robot se encuentra en su forma individual pero si cuando está en conjunto con otros robots permitiendo configuraciones como la tipo serpiente.

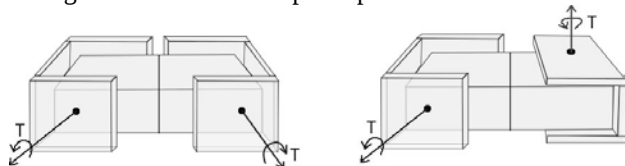


Figura 2. Representación de cabeceo (cabeceo y cabeceo)-viraje.

2.3 Software de simulación robótica

A pesar de la gran cantidad de software de simulación robótica que hay en el mercado tanto de forma gratuita como de pago como el Microsoft Robotics Studio, Gazebo, SimRobot, USARSim entre otros la estrategia de autorreconfiguración se desarrolla en el entorno de simulación Webots. Este es un simulador robótico desarrollado en el École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) en Suiza por Oliver Michel. Utiliza Open Dynamics Engine (ODE) para simular la dinámica de cuerpos rígidos y las colisiones entre cuerpos. Contiene una amplia biblioteca con modelos 3D de robots comerciales y es relativamente fácil de añadir otros nuevos desarrollados por nosotros. Solo tenemos que considerar las propiedades geométricas y físicas. Webots ofrece una amplia gama de sensores, actuadores y servos, pinzas, etc.

2.4 Estrategia para la autorreconfiguración

Para lograr la autorreconfiguración se propone una estrategia que será básica en esta primera etapa del proyecto. Se propone que sea en un principio un grupo de robots que se puedan comunicar entre ellos y un robot supervisor o un supervisor humano, no se tendrán en cuenta por el momento obstáculos, pero se tendrá en cuenta que los algoritmos puedan ser sensibles a nuevas tareas que puedan surgir en un futuro como ya se mencionó anteriormente la evasión de obstáculos, reconocimiento de objetos, reconstrucción de entornos entre otras tareas.

Los primeros parámetros que se deben tener en cuenta son los siguientes:

- Comunicación entre robots.
- Orientación y posición relativa de los módulos.
- Tipos de locomoción a utilizar según la tarea a realizar.

Se propone hacer uso de los componentes físicos que se pueden adaptar a cada uno de los robots. El primero para generar la comunicación entre los módulos se propone el uso de dispositivos zigbee, que además de proveer la comunicación entre los módulos y el supervisor se

propone su uso para poder identificar la posición relativa de cada robot usando un método para posicionamiento en interiores basado en indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI, por sus siglas en inglés) y triangulación de la señal.

Para poder establecer la orientación se usará de una unidad de movimiento inercial (IMU, por sus siglas en inglés). Con estos datos ya se puede generar un control que permita a los módulos encontrarse y ensamblarse de forma correcta.

2.5 Estrategia de control

La teoría clásica de control provee un gran espectro de estrategias para el diseño de controladores por sistemas lineales y no lineales como los métodos de control optimal [11], control robusto [12] y diferentes mecanismos de control adaptativo [13]. Lo que se busca con este proyecto es crear un tipo de control que sea fácil de implementar, de bajo costo computacional, rápido de implementar y que proporcione la capacidad de adaptarse a las tareas futuras que pueden ser más complejas, sin perder las capacidades ya alcanzados o comprometerlas. Por esta razón, un control de lógica difusa es acompañado por una máquina de estados finitos y subdividido en tareas para la reorientación y la posición relativa.

2.5.1 Máquina de estados finitos

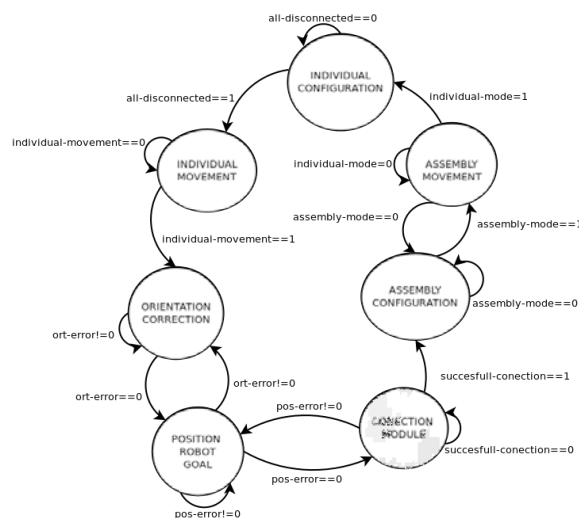


Figura 3. Máquina de estado finitos (FSM) propuesta.

Una máquina de estados finitos es un modelo de datos que permite a un programador representar una lista de reglas en forma de estados, condiciones y transiciones: Cada FSM puede ser representada con un grafo, similar a un mapa de ferrocarril. Los estados, son funciones que pueden ser comparadas como las estaciones del tren. Las transiciones son el movimiento entre estado y estado y pueden ser representadas como las vías del ferrocarril.

Las condiciones son parámetros que deben ser satisfechos para poder realizar una transición, como los *switch* de cambio de vía. Para alcanzar un estado desde otro el camino debe ser recorrido en un orden específico. Las máquinas de estados finitos han sido usadas en robótica para diferentes propósitos. Recientemente, han sido usadas en una amplia variedad de aplicaciones de robótica de enjambre para manejar la complejidad de los comportamientos de enjambre.

En la Figura 3 se muestra la máquina de estados finitos propuesta para el robot Mecabot.

2.5.2 Control por lógica difusa

Dentro de los estados de la FSM existen dos algoritmos de lógica difusa uno para la orientación del módulo y el otro para la distancia de acoplamiento.

Para el control de orientación se calcula el error de orientación el cual se computa con los datos que proveen las unidades de movimiento Inercial de cada uno de los robots que se piensan acoplar. Ya que las posiciones de los robots son relativas, estas deben ser actualizadas constantemente y es en ese entonces que la comunicación entre robots se vuelve fundamental y así mantener el error de orientación en cero. El proceso de fusificación tiene como objetivo convertir valores reales en valores difusos. En la Figura 4 se muestran las funciones de membresía de la entrada y la salida para el control de orientación. En la tabla 1 y en la tabla 2 se definen los sets difusos para la entrada y salida del control difuso para la orientación

Parámetro: Error de orientación	
Símbolo: EO	
Valores	
bn	Big Negative
mn	Medium Negative
sn	Small Negative
z	Zero
sp	Small Positive
mp	Medium Positive
bp	Big Positive

Tabla 1 Sets difusos para la entrada del control de orientación

Parámetro: Velocidad Angular	
Símbolo: W	
Valores	
bn	Big Negative
mn	Medium Negative
sn	Small Negative
z	Zero
sp	Small Positive
mp	Medium Positive
bp	Big Positive

Tabla 2 Sets difusos para la salida del control de orientación.

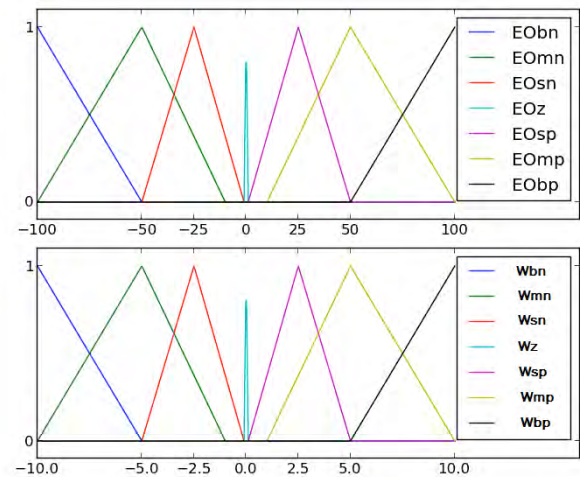


Figura 4 Funciones de membresía para el control de orientación.

Cuando el error de orientación es cero, el control de distancia se encarga de acercar los robots hasta lograr la distancia adecuada para poder acoplar los módulos, durante el curso es obvio que el error de orientación cambiara y en este momento el control de distancia dejara de funcionar para darle paso de nuevo al error de orientación. En la figura 5 se muestran las funciones de membresía de la entrada y la salida para el control de distancia. En la Tabla 3 y en la Tabla 4 se definen los sets difusos para la entrada y salida del control difuso para la distancia.

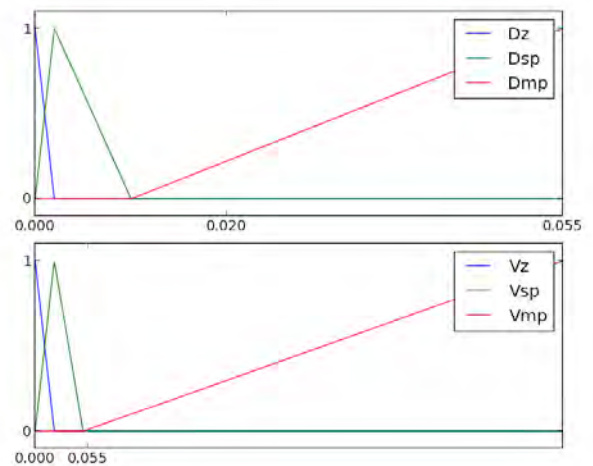


Figura 6 Funciones de membresía para el control de distancia.

Parámetro: Error de distancia.	
Símbolo: D	
Valores	
mp	Médium positive
sp	Small positive
z	Zero

Tabla 5 Sets difusos para la entrada del control de distancia

Parámetro: Velocidad Lineal	
Símbolo: V	
Valores	
mp	Médium positive
sp	Small positive
z	Zero

Tabla 6 Sets difusos para la salida del control de distancia.

Del conocimiento humano se definen una serie de reglas que permiten el comportamiento correcto del robot. El comportamiento que se desea cuando el control de orientación esté en funcionamiento es simple cuando el robot necesite ser reorientado se utilizarán los platos laterales como ruedas diferenciales para que gire sobre su propio centro hasta ubicarse correctamente y el error de orientación tienda a cero. En la Tabla 7 se muestran la serie de reglas propuestas para el control de orientación.

REGLA	ENTRADA	SALIDA
1	EObn	Wbp
2	EOmn	Wmp
3	EOsn	Wsp
4	EOz	Wz
5	EOsp	Wsn
6	EOmp	Wmn
7	EObp	Wbn

Tabla 7 Sets de reglas para el control de orientación.

De forma similar se desea que se comporte el control de distancia en el cual haciendo uso de los pivotes que funcionan con un comportamiento sinusoidal permiten que el robot genere un movimiento parecido al de una oruga, al disminuir el error de distancia el robot tenderá a desplazarse menos hasta que logre una distancia óptima en la cual ya puede generar el ensamble. En la Tabla 8 se muestran las reglas propuestas para el control de distancia.

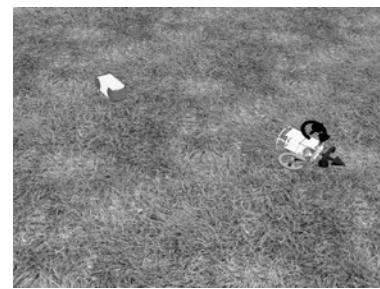
REGLA	ENTRADA	SALIDA
1	Dz	Vz
2	Dsp	Vsp
3	Dmp	Vmp

Tabla 8 Sets de reglas para el control de orientación.

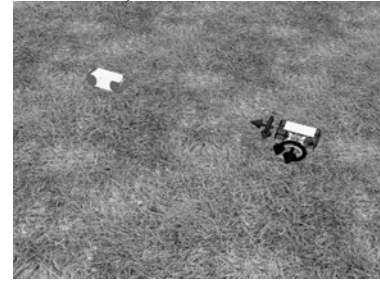
El método de defusificación utilizado es el método del centroide. Utilizando este método se ahorra tiempo computacional y produce un comportamiento fácilmente ajustable. En general el uso de lógica difusa genera un comportamiento fiable, robusto y de comportamiento predecible.

2.5.3 Verificación de la estrategia en webots

Una vez implementada la estrategia se puede evidenciar en el ambiente de simulación. En la Figura 7 se muestra el correcto funcionamiento del algoritmo de control de lógica difusa para corregir el error de orientación entre dos módulos.



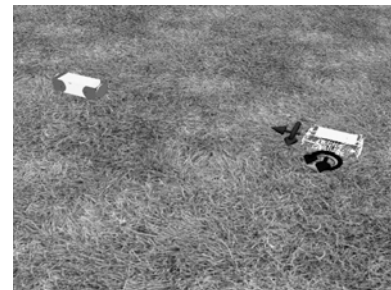
a) Primer momento.



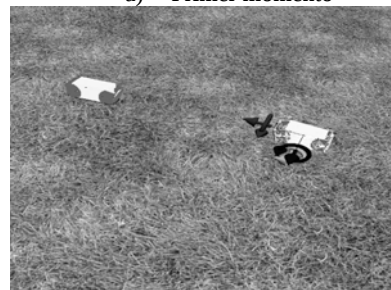
b) Segundo momento.

Figura 7 Verificación del algoritmo de control de orientación.

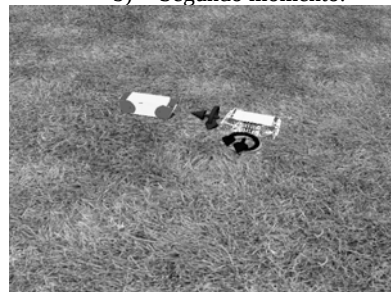
Como se mencionó una vez que el error de orientación se hace cero la máquina de estados finitos cambia de estado y activa el control de distancia. En la Figura 8 se muestra su correcto funcionamiento.



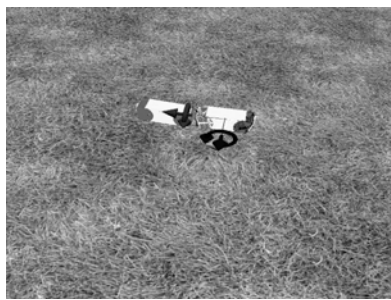
a) Primer momento



b) Segundo momento.



c) Tercer momento.



d) Cuarto momento



e) Quinto momento.

Figura 8 Verificación del algoritmo de control de distancia y correcto ensamble.

3. CONCLUSIONES

La arquitectura de estados finitos permite la composición de múltiples comportamientos para producir más refinados e inteligentes modos de operación. Combinando el control por lógica difusa y la máquina de estados finitos permite que la programación y la implementación sean sencillas y transferibles a otros módulos con características similares.

En términos del trabajo futuro, se espera construir una serie de prototipos funcionales que permitan implementar los algoritmos que se desarrollaron en este trabajo. En términos de la inteligencia artificial se pueden implementar nuevos algoritmos que sean más eficientes y provean un nivel más alto de autonomía para los robots y así realizar tareas más complejas como exploración, búsqueda y rescate.

Agradecimientos

Le agradecemos cordialmente a la Universidad Militar Nueva Granada por su apoyo al proyecto de investigación ING 1538. De igual forma al grupo de investigación DAVINCI por su soporte y monitoria.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Kernbach, O. Scholz, K. Harada, S. Popescu, J. Liedke, H. Raja, W. Liu, F. Caparrelli, J. Jemai, J. Havlik, E. Meister, y P. Levi, «Multi-Robot Organisms: State of the Art», *ArXiv11085543 Cs*, ago. 2011.
- [2] C. Yu y R. Nagpal, «Self-adapting modular robotics: A generalized distributed consensus framework», en *in Proc. ICRA*, 2009.
- [3] J. González Gómez, «Robótica modular y locomoción: aplicación a robots ápodos», 2008.
- [4] Ó. Rubiano, C. Hurtado, y R. Castillo, «Desing and simulation of a reconfigurable modular robot», *22nd Inter Natl. Congr. Mech. Eng.*, pp. 7703 - 7714, 2013.
- [5] M. Yim, C. Eldershaw, Y. Zhang, y D. Duff, «Limbless Conforming Gaits with Modular Robots», en *Experimental Robotics IX*, M. H. A. Jr y O. Khatib, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2006, pp. 459-468.
- [6] D. Christensen, D. Brandt, K. Stoy, y U. P. Schultz, «A unified simulator for Self-Reconfigurable Robots», en *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008*, 2008, pp. 870-876.
- [7] Z. Butler, S. Byrnes, y D. Rus, «Distributed motion planning for modular robots with unit-compressible modules», en *2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2001. Proceedings*, 2001, vol. 2, pp. 790-796 vol.2.
- [8] K. Kotay, D. Rus, M. Vona, y C. McGray, «The self-reconfiguring robotic molecule», en *1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998. Proceedings*, 1998, vol. 1, pp. 424-431 vol.1.
- [9] S. Murata, E. Yoshida, A. Kamimura, H. Kurokawa, K. Tomita, y S. Kokaji, «M-TRAN: self-reconfigurable modular robotic system», *IEEEASME Trans. Mechatron.*, vol. 7, n.º 4, pp. 431-441, dic. 2002.
- [10] B. Salemi, M. Moll, y W.-M. Shen, «SUPERBOT: A Deployable, Multi-Functional, and Modular Self-Reconfigurable Robotic System», en *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2006, pp. 3636-3641.
- [11] D. E. Kirk, *Optimal Control Theory: An Introduction*. Courier Dover Publications, 2012.
- [12] J. Ackermann y P. Blue, *Robust Control: The Parameter Space Approach*. Springer Science & Business Media, 2002.
- [13] E. Meister y A. Gutenkunst, «Self-Adaptive Framework for Modular and Self-Reconfigurable Robotic Systems», presentado en *ADAPTIVE 2012, The Fourth International Conference on Adaptive and Self-Adaptive Systems and Applications*, 2012, pp. 30-37.

COMPARACIÓN DEL RENDIMIENTO COMPUTACIONAL ENTRE DIFERENTES METODOLOGÍAS DE PROCESAMIENTO EN PARALELO PARA FEA VÍA ANSYS®

14.5

Computational performance comparison between different methodologies for parallel processing using fea through ansys ® 14.5

RESUMEN

La reducción de tiempos de procesamiento computacional en procesos de simulación en ingeniería es un tema importante en la actualidad. Hoy, se cuenta con diversas alternativas de procesamiento en paralelo y computación de alto desempeño (HPC) que permiten reducir dicha variable de interés. En este trabajo se representa el modelo de un dispositivo mecánico de anclaje para sistemas eléctricos de transmisión de alto voltaje, para el cual se desarrolla un diseño de experimentos con y sin solución distribuida, y con o sin *Hyper-Threading* (HT). Tomando como parámetros de análisis valores como: tiempos de procesamiento, solución de ecuaciones computacionales y memoria máxima utilizada, los resultados se ofrecen en gráficas de rendimiento para cada configuración de procesamiento.

Palabras clave: computación de alto desempeño, computación en paralelo, *Hyper-Threading* (HT), núcleo, simulación.

ABSTRACT

Reduce computational processing time in engineering simulation process is an important issue. Currently, there are several alternatives for parallel processing and high performance computing (HPC) that reduce this variable of interest. In this paper the model of a mechanical anchoring systems for electric high voltage transmission is represented, for which was performed an experiments design with and without distributed solution, and with or without Hyper-Threading (HT). Taking has analysis parameters values processing times, solving of computational equations and the maximum memory used. Has results are performance graphs for each processing configuration are presented.

Keywords: Core, High Performance Computing, Hyper-Threading (HT), Parallel Computing, Simulation.

1. INTRODUCCIÓN

El constante avance de las computadoras, así como el uso del modelado matemático en áreas científicas, ingenieriles y técnicas, provocó una revolución en el campo de los métodos numéricos. Así se abrieron las puertas al análisis de diversas problemáticas, a la solución de problemas complejos, por medio de elementos finitos o volúmenes finitos, y a la resolución de ecuaciones diferenciales parciales, las cuales eran muy complejas y se resistían a métodos analíticos, estadísticos o experimentales. Estos métodos numéricos consisten en reducir problemas continuos (de física, química, etc.), a sistemas discretos de ecuaciones lineales, que pueden ser resueltos por un método directo o por uno iterativo, para así buscar la convergencia de la solución numérica hacia la solución exacta del problema [3].

El poder de cómputo juega un papel definitivo en la aplicación de los métodos numéricos como herramientas de simulación computacional aplicadas a la ingeniería, ya que de este dependerán parámetros como la exactitud de los resultados, el tiempo de análisis o la viabilidad de evaluar un problema. Por tal razón, es necesario buscar formas para aprovechar al máximo el *hardware* con el cual se cuenta.

La tecnología de *Hyper-Threading* de Intel® permite usar los recursos del procesador de una manera más eficiente, habilitando la ejecución de múltiples hilos en cada núcleo. Esto, combinado con la tecnología de multi-núcleos, permite aumentar la capacidad de procesamiento de la máquina. Esta tecnología brinda un aumento en el rendimiento y la ejecución de las tareas del sistema, que se adapta de manera dinámica a la carga de trabajo y deshabilita automáticamente los núcleos inactivos. Así

CRISTIAN MANCILLA

Estudiante, investigador y auxiliar de docencia de Ingeniería Mecatrónica.
Instituto Tecnológico Metropolitano.
cristianmancilla17@gmail.com

CARLOS SÁNCHEZ

Estudiante investigador de Ingeniería Mecatrónica.
Instituto Tecnológico Metropolitano.
carlossanchez1307@gmail.com

DIEGO HINCAPIÉ

Ingeniero Mecánico M. Sc.
Docente investigador.
Instituto Tecnológico Metropolitano.
diegohincaapie@itm.edu.co

incrementa la frecuencia del procesador en los núcleos ocupados y genera un rendimiento mayor para aplicaciones de hilos [1].

Este trabajo busca establecer, por medio de comparativas, una configuración óptima para la realización de análisis en diferentes módulos de Ansys® 14.5, manipulando parámetros tales como la cantidad de núcleos, el uso de *Hyper-Threading* y la solución distribuida.

2. METODOLOGÍA

Este trabajo se estructura en tres etapas: la selección de los modelos virtuales para el análisis, la configuración de la simulación de los modelos seleccionados y el análisis y discusión de los resultados.

2.1 Selección del modelo virtual para el análisis

Con el fin de evaluar los recursos computacionales de simulación de procesos de ingeniería con los que cuenta el ITM, se seleccionó un proyecto que viene analizándose en el módulo estructural de Ansys® 14.5, para tener una mejor idea del rendimiento presentado por los equipos de cómputo en dichas aplicaciones.

El modelo computacional seleccionado representa un dispositivo mecánico de anclaje para sistemas eléctricos de transmisión de alto voltaje, el cual es un sistema compuesto por cinco elementos mecánicos, dos de ellos metálicos que son la campana y el perno (Figura 1.a-e, respectivamente) y tres cerámicos que son el cemento superior (Figura 1.b) localizado entre la campana y la porcelana, la porcelana (Figura 1.c) y el cemento inferior (Figura 1.d) localizado entre la porcelana y el perno, los cuales fueron ensamblados (Figura 1.f) en el *software Solid Edge® St4* de Siemens y posteriormente acoplados, por medio de contactos rígidos en el módulo de análisis estructural de Ansys® 14.5 (conocido también como Análisis de Elementos Finitos - FEA).

Figura 1. Modelo virtual del aislador eléctrico tipo Clevis elaborado en Solid Edge® St4. Constituido por campana (a) y perno (e) de material metálico, y cemento superior (b), porcelana (c) y cemento inferior de material cerámico, relacionados entre sí por medio de ensamble (f).

Posteriormente, se lleva a cabo una simplificación geométrica del modelo, la cual consiste en desarrollar un corte en la zona inferior del cerámico (Figura 2d), debido a que gracias a un estudio computacional de geometrías, realizado a dicho modelo, permitió establecer que durante una prueba mecánica de tracción esta zona no arroja información relevante y, por ende, puede ser descartada. Simplificación que permite disminuir el tiempo de análisis computacional en los respectivos módulos de Ansys®.

Figura 2. Modelo virtual del aislador eléctrico tipo Clevis. Elaborado en Solid Edge® St4: a) ensamble y b) porcelana sin simplificación. Modificado en Ansys® 14.5: c) ensamble con porcelana simplificada y d) porcelana simplificada.

2.2 Configuración de la simulación para el modelo seleccionado

Una vez se cuenta con el modelo tridimensional y las variables de operación para dicho proceso, se procede a la configuración del entorno de simulación, partiendo de las características del equipo para el análisis, constituido por una *Workstation Dell T7600*, que cuenta con dos procesadores Intel® E5-2667 de 2.9 GHz, 64 Gb de memoria RAM.

Para garantizar que la información de los experimentos no sea contaminada por otro tipo de procesos subyacentes en la CPU, Ansys® 14.5 y sus módulos son los únicos programas ejecutados en la CPU (aparte de las aplicaciones nativas del sistema operativo), además de generar un archivo independiente para cada configuración (los cuales se presentan a continuación) y, por último, se reinicia el equipo al final de cada simulación, una vez guardados los datos, con el fin de garantizar que no hayan quedado operaciones o procesos subyacentes en el sistema, que puedan alterar la veracidad de los resultados y/o la información en la próxima simulación.

Para llevar a cabo el análisis del dispositivo mecánico de anclaje se hace uso del módulo de Análisis Estructural de Ansys® 14.5, donde se define la cantidad de núcleos que serán empleados para el procesamiento de las variables y las ecuaciones del entorno; en primera instancia, se utilizan distribuciones de 1, 2, 4, 6, 8, 10 y 12 núcleos de procesamiento, sin y con solución distribuida (configuración A y B, respectivamente), en una segunda medida se procede a la activación de la tecnología *Hyper-Threading* (HT), la cual permite el uso del doble de los núcleos físicos de la máquina, por medio de la generación de núcleos virtuales, con esto se desarrolla una nueva serie de análisis con 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20 y 24 núcleos con distribución de solución (configuración C).

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Análisis estructural de una suspensión eléctrica

En la Figura 3 se puede observar el comparativo del tiempo que emplea el programa para acoplar la estructura del análisis y realizar las preparaciones requeridas para la ejecución de cada una de las configuraciones definidas previamente. Resultados que se pueden observar numéricamente en la Tabla 1.

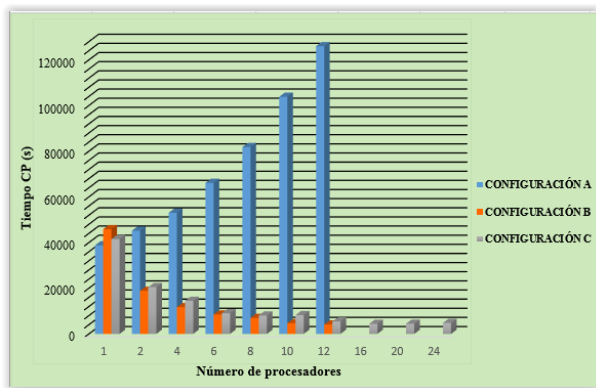


Figura 3. Resultados del tiempo de acoplamiento (CP) en segundos, de las configuraciones A, B y C (definidas anteriormente) para un análisis estructural de una suspensión eléctrica.

Tabla 1. Resultados del tiempo de acoplamiento (CP) en segundos, de las configuraciones A, B y C (definidas anteriormente) para un análisis estructural de una suspensión eléctrica.

De los valores plasmados en la Tabla 1, se identifica que para la configuración A, el menor tiempo de acoplamiento empleado para el análisis se presenta en la implementación de un solo núcleo, para la configuración B se da utilizando 12 núcleos y para la configuración C en 16 núcleos, con valores de 38801.520, 4110.798 y 4384.408 segundos, respectivamente. Permitiendo determinar que, para este factor de rendimiento, la configuración B con el máximo uso de los núcleos posibles, para dicha distribución, es la más adecuada a la hora de llevar a cabo este tipo de análisis.

Una vez preparados los parámetros internos requeridos para el análisis, llevados a cabo por el programa Ansys® 14.5, se procede a la ejecución del mismo, el cual arroja los resultados exhibidos en la Figura 4, donde se presenta el tiempo empleado por el programa para llevar a cabo la solución de las diferentes configuraciones planteadas anteriormente.

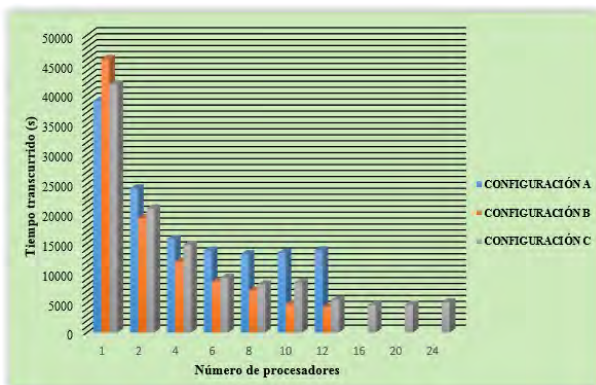


Figura 4. Resultados del tiempo transcurrido (en segundos) de las configuraciones A, B y C (definidas anteriormente) para un análisis estructural de una suspensión eléctrica.

Tabla 2. Resultados del tiempo transcurrido (en segundos) de las configuraciones A, B y C (definidas anteriormente) para un análisis estructural de una suspensión eléctrica.

En la Tabla 2, se puede observar que, para la configuración A, el menor tiempo transcurrido para llevar a cabo el análisis se presenta en la implementación de 8 núcleos, para la configuración B, se da utilizando 12 núcleos y para la configuración C, en 16 núcleos, con valores de 13155, 4238 y 4585 segundos, respectivamente. Valores con los cuales se determina que nuevamente, para este factor de rendimiento, la configuración B con el máximo uso de los núcleos posibles, para dicha distribución, es la más adecuada a la hora de llevar a cabo este tipo de análisis.

Los hilos de ejecución representan un conjunto de instrucciones secuenciales que son ejecutadas en paralelo con otros hilos, bajo la supervisión de un hilo principal o coordinador (Monetti y Leon, 2014). Dichos hilos son un parámetro de estudio importante, debido a que generan un gran impacto en el tiempo total de procesamiento y, a su vez, en el rendimiento del equipo, por lo cual se ilustra en la Figura 5 el tiempo total de CPU sumado de todos los hilos y en la Figura 6 el tiempo total de CPU para hilo principal, en ambos resultados se utilizan las diferentes configuraciones planteadas previamente para el análisis estructural de la suspensión eléctrica. Además de las tablas respectivas con los valores numéricos para cada uno de los resultados (Tabla 3 y Tabla 4, respectivamente).

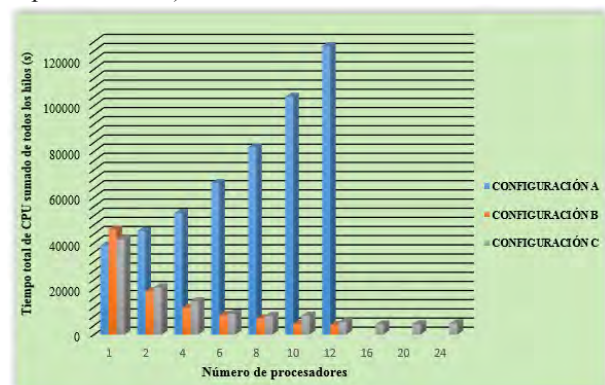


Figura 5. Resultados del tiempo total de CPU sumado de todos los hilos (en segundos) de las configuraciones A, B y C (definidas anteriormente) para un análisis estructural de una suspensión eléctrica.

Tabla 3. Resultados del tiempo total de CPU sumado de todos los hilos (en segundos) de las configuraciones A, B y C (definidas anteriormente) para un análisis estructural de una suspensión eléctrica.

En la Tabla 3 se puede apreciar que, para la configuración A, el menor tiempo total de CPU sumado de todos los hilos de ejecución empleado para la realización del análisis se da en la implementación de 8 núcleos, para la configuración B, con 12 núcleos y para la configuración C, con 16 núcleos, con valores de 38801.5, 4110.8 y 4384.4 segundos, respectivamente. Valores que nuevamente permiten determinar que, para este factor de rendimiento, la configuración B con el máximo uso de los núcleos posibles, para dicha distribución, es la más adecuada a la hora de llevar a cabo este tipo de análisis.

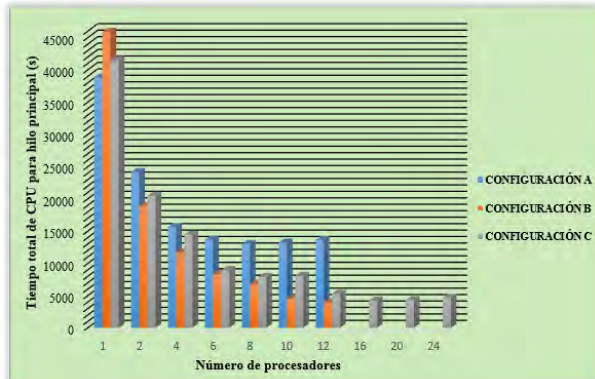


Figura 6. Resultados del tiempo total de CPU para hilo principal (en segundos) de las configuraciones A, B y C (definidas anteriormente) para un análisis estructural de una suspensión eléctrica.

Tabla 4. Resultados del tiempo total de CPU para hilo principal (en segundos) de las configuraciones A, B y C (definidas anteriormente) para un análisis estructural de una suspensión eléctrica.

De los valores plasmados en la Tabla 4, se identifica que para la configuración A, el menor tiempo total de CPU para hilo principal de ejecución empleado para la realización del análisis, se presenta en la implementación de 8 núcleos, para la configuración B, de 12 núcleos y para la configuración C de 16 núcleos, con valores de 12964.1, 3920.9 y 4172.0 segundos, respectivamente. Lo anterior permite determinar, como en los casos anteriores, que para este factor de rendimiento la configuración B con el máximo uso de los núcleos posibles, para dicha distribución, es la más adecuada a la hora de llevar a cabo este tipo de análisis.

En la Figura 7 se presenta el total de la memoria máxima utilizada por cada una de las configuraciones realizadas (A, B y C), con que cual se podrá determinar cuál de estas requiere una menor capacidad de memoria para llevar a cabo el análisis. Resultados que se encuentran plasmados numéricamente en la Tabla 5.

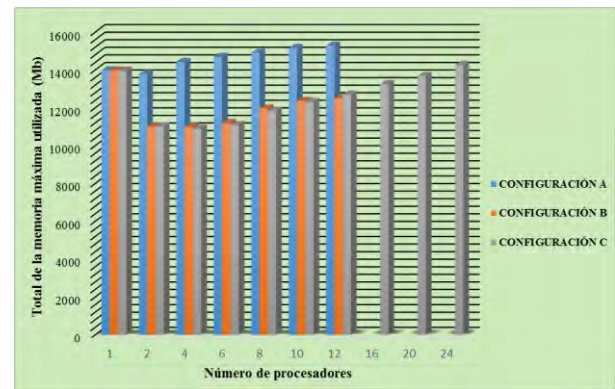


Figura 7. Resultados del total de la memoria máxima utilizada (en Mb) de las configuraciones A, B y C (definidas anteriormente) para un análisis estructural de una suspensión eléctrica.

Tabla 5. Resultados del total de la memoria máxima utilizada (en Mb) de las configuraciones A, B y C (definidas anteriormente) para un análisis estructural de una suspensión eléctrica.

En la Tabla 5 se puede observar que para la configuración A, la memoria máxima utilizada presenta un menor consumo en la implementación de 2 núcleos, para las configuraciones B y C, de 4 núcleos, con valores de 13775, 10987 y 10896 Mb, respectivamente. Valores con los cuales se determina que, para este factor de rendimiento, la configuración C implementando 4 núcleos, podría ser considerada la más adecuada a la hora de llevar a cabo este tipo de análisis, pero que pese a ello no presenta una gran variación con respecto al valor arrojado por la configuración B con implementación de la misma cantidad de núcleos, ya que se da una diferencia del 0.8 %, lo cual podría ser considerado como una cantidad despreciable.

En la Figura 8 se presenta la velocidad de solución de las ecuaciones computacionales, que permiten determinar cuál de las configuraciones realizadas ejecutó y desarrolló en el menor tiempo posible las ecuaciones requeridas durante el análisis estructural del aislador eléctrico. Además de sus respectivos valores en la Tabla 6.

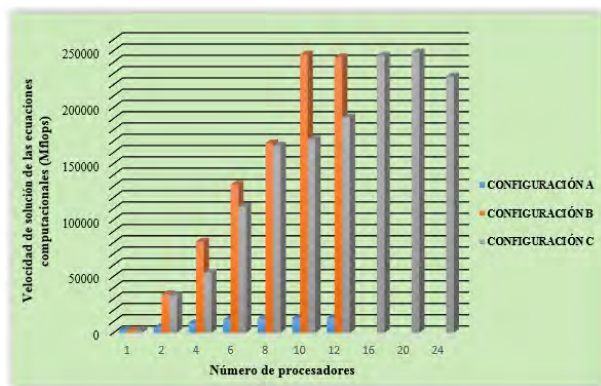


Figura 8. Resultados de la velocidad de solución de las ecuaciones computacionales (en Mflops) de las configuraciones A, B y C (definidas anteriormente) para un análisis estructural de una suspensión eléctrica.

Tabla 6. Resultados de la velocidad de solución de las ecuaciones computacionales (en Mflops) de las configuraciones A, B y C (definidas anteriormente) para un análisis estructural de una suspensión eléctrica.

En la Tabla 6 se puede observar que para las configuraciones A y B, la velocidad de solución de las ecuaciones computacionales es mayor en la implementación de 10 núcleos y para la configuración C, de 20 núcleos, con valores de 13347.4, 246876.9 y 248628.1 Mflops, respectivamente. Valores con los cuales se determina que, para este factor de rendimiento, la configuración C implementando 20 núcleos, podría ser la más adecuada a la hora de realizar este tipo de análisis, pero que pese a ello, no se está viendo reflejada dicha velocidad en los diferentes tiempos y factores de rendimientos contemplados anteriormente, para poder determinar esta configuración como la más idónea para dicho proceso.

Observando solo una diferencia del 1 % entre las velocidades presentadas en la configuración B cuando se implementan 10 y 12 núcleos (este último con un valor de 244387.2 Mflops), por lo cual podría considerarse que, dados los resultados en los factores de rendimiento planteados anteriormente, la configuración B es la más adecuada para llevar a cabo el análisis estructural del aislador eléctrico.

4. CONCLUSIONES

Se encontró que antes de comenzar el análisis mecánico, el *software* asigna un valor estático de memoria para la realización de cada proceso, el cual no se ve afectado por el requerimiento de una mayor cantidad de núcleos o por la activación de solución distribuida.

Se puede observar que el uso del *Hyper-Threading* no genera un impacto significativo en los tiempos de

procesamiento, por ende se puede concluir que esta característica no afecta a gran escala los procesos computacionales que están envueltos en el funcionamiento y la aplicación del módulo de Análisis Estructural de Ansys® 14.5.

La solución distribuida para el caso del módulo estructural brinda una mayor eficiencia computacional al obtener resultados en menores tiempos de procesamiento.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Intel Corporation. (25 de junio de 2014). Intel® Hyper-Threading Technology. [Online] Obtenido de <http://www.intel.com/content/www/us/en/architecture-and-technology/hyper-threading/hyper-threading-technology.html>
- [2] Monetti, J., & Leon, O. (3 de septiembre de 2014). Sedici repositorio institucional de la UNPL. Uso de threads para la ejecución en paralelo sobre una malla computacional: [Online] Aviable: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/19827>
- [3] Skiba, Y, *Métodos Y Esquemas Numéricos: Un Análisis Computacional*. México D. F.: D.R. Universidad Nacional Autónoma de México (2005).

ENSAMBLE, ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL VEHÍCULO OPEN ROV V2.6

Assembly, analysis and simulation of Open ROV V2.6 vehicle

RESUMEN

En el siguiente trabajo se recogen los aspectos más importantes del ensamble, análisis y simulación del vehículo Open ROV V2.6, en el que se abordan temas de análisis y simulación en cuanto a aspectos mecánicos del robot, tales como análisis por elementos finitos, análisis de elementos de control (actuadores), comportamiento en un entorno ideal, y aspectos relativos a la simulación en condiciones ideales en un espacio bidimensional. Además, se hacen algunas apreciaciones respecto a la implementación de una estrategia de control.

Palabras clave: análisis por elementos finitos, Open ROV, simulación.

ABSTRACT

This paper presents the most important aspects about simulation and analysis of the Open ROV V2.6 vehicle, dealing especially with mechanical aspects of robot, including finite element analysis, control elements, like actuators simulation and its behavior on ideal conditions in a bi-dimensional plane; moreover, some appreciations about control strategies for a possible implementation are done.

Keywords: finite element analysis, Open ROV, simulation.

MARÍA LUISA PINTO SALAMANCA

M.Sc. Automatización Industrial
Directora Grupo de investigación en Energías y Nuevas Tecnologías (Gente)
Ingeniería Electromecánica, UPTC
Duitama, Boyacá, Colombia
marialuisa.pinto@uptc.edu.co

CARLOS EDUARDO AGUDELO VELANDIA

Estudiante
Semillero Colciencias, Grupo de investigación en Energías y Nuevas Tecnologías (Gente)
Ingeniería Electromecánica, UPTC
Duitama, Boyacá, Colombia
carlos.agudelo@uptc.edu.co

JUAN DIEGO CAÑÓN ROJAS

Estudiante
Semillero Colciencias, Grupo de investigación en Energías y Nuevas Tecnologías (Gente)
Ingeniería Electromecánica, UPTC
Duitama, Boyacá, Colombia
juan.canon@uptc.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la robótica en distintos aspectos de la vida está marcado por las necesidades de la sociedad. El caso de los aparatos sumergibles no es una excepción, y es un campo que, aunque ha tenido un desarrollo importante, existen todavía en él muchas posibilidades de investigación. Adicionalmente, los dispositivos actuales tienen limitaciones en sus condiciones de operación y maniobrabilidad que aún no se han solucionado.

El dispositivo usado es un prototipo ya desarrollado, que ofrece la posibilidad de mejorar sus condiciones actuales de operación, ya que se trata de un robot de carácter abierto (*open source*), por lo que se dispone de cierta flexibilidad en el momento de realizar la implementación tanto en código como en construcción. Esta circunstancia brinda una forma de construir conocimiento en un campo que aún tiene demasiados elementos por mejorar.

2. CONTENIDO

Los submarinos son embarcaciones capaces de navegar bajo el agua, y fueron desarrollados a partir del siglo

XVII. Desde entonces han tenido un gran desarrollo tecnológico y son utilizados principalmente para fines militares. En los últimos tiempos, los estudios e investigaciones apuntan, entre otros fines, a eliminar las tripulaciones, buscando proteger la vida humana, minimizar los costos, reducir el gasto energético, alcanzar mayores profundidades y alargar los tiempos de inspección en el fondo marino.

En la actualidad, muchos de estos vehículos submarinos se utilizan principalmente en exploración de fondos acuáticos; inspección y mantenimiento de tuberías que conducen petróleo, gas o aceite en plataformas oceánicas; tendido y revisión de cableado para comunicaciones; investigaciones geológicas, ambientales o geofísicas; y operaciones militares.

Hoy en día, los vehículos subacuáticos no tripulados se conocen como UUV (Unmanned Underwater Vehicle), entre los cuales se distinguen dos tipos: ROV (Remote Operated Vehicle) y AUV (Autonomous Underwater Vehicle). En todo caso, unos y otros cuentan con tres componentes comunes: navegación, sensorica y comunicación [1].

Open ROV es un tipo de vehículo no tripulado submarino de código abierto controlado a distancia, cuya construcción forma parte de una tendencia llamada DIY (Do-It-Yourself o “hazlo tú mismo”), cuya estructura física básica es un conjunto de piezas de acrílico para ensamblar en casa. El prototipo tiene iluminación LED para ambientes escasos de luz, tres motores que permiten el desplazamiento en ecosistemas acuáticos, una cámara HD para transmisión de imágenes del entorno, una tarjeta electrónica que actúa como cerebro, baterías recargables que posibilitan un tiempo estimado de navegación de tres horas, y una estructura que soporta presiones hasta de 100 m de profundidad. Es importante agregar que el Open ROV es un vehículo submarino de bajo costo [2].

El Open ROV V2.6 permite, entre otras cosas, la realización de exploraciones en entornos marinos; investigaciones para identificar problemas ambientales en ríos, lagunas, lagos y mares y; riego de químicos para detener la proliferación de especies que puedan convertirse en amenazas para un ecosistema.

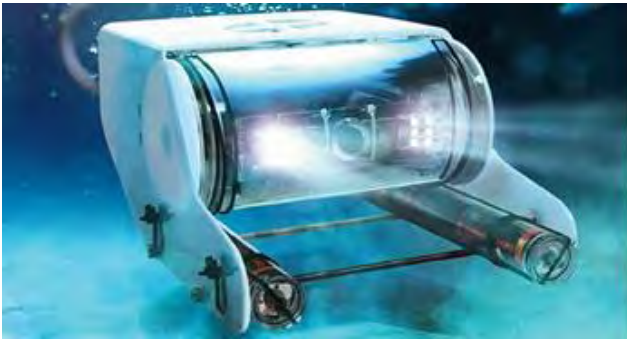


Figura 1. Vehículo de Operación Remota Open ROV V2.6. [Fuente: <http://www.entrepreneur.com/article/230845>].

Debido a que, cuando se compra, el vehículo de operación remota se encuentra desensamblado, hay que hacer un ensamble cuidadoso para que se le pueda usar como medio de investigación. A continuación se muestran, en las figuras, algunos pasos de este proceso.



Figura 2. Kit Open ROV [Fuente: Grupo de investigación Gente, UPTC].



Figura 3. Ensamble de la estructura del Open ROV [Fuente: Grupo de investigación Gente, UPTC].

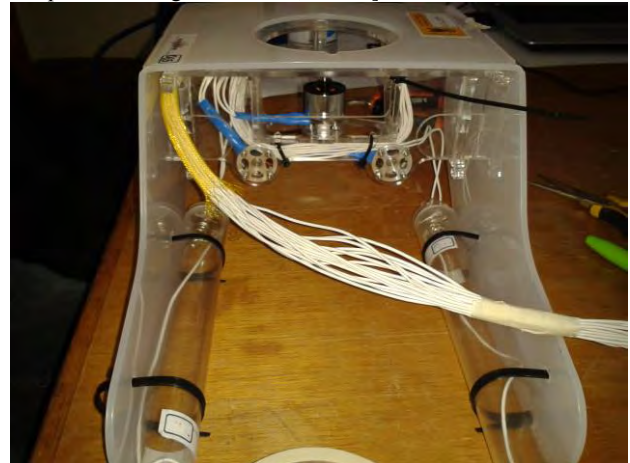


Figura 4. Ensamble del Open ROV [Fuente: Grupo de investigación Gente, UPTC].

DINÁMICA DE FLUIDOS IDEALES

Un fluido ideal es aquel que solo puede ocasionar presiones y nunca fuerzas de arrastre, y también está libre de rozamientos internos y externos. Además, al fluido ideal se le adjudica una total incompresibilidad, que impide que tenga cambios de volumen.

Fundamentalmente, la energía total de un cuerpo puede manifestarse en las siguientes formas:

- Energía mecánica: -Energía potencial: - Energía por posición
- **Energía por presión**
-Energía cinética
- Energía interna: Energía interna de las moléculas
- Energía eléctrica
- Energía magnética
- Energía química
- Energía másica de los núcleos atómicos

PARADOJA DE D'ALEMBERT

Con la aproximación de flujo irrotacional, la fuerza de arrastre sobre cualquier cuerpo sin sustentación, sumergido de cualquier forma en un flujo uniforme, es cero; es decir, los fluidos ideales no ejercen ninguna fuerza de arrastre sobre los cuerpos sumergidos [3] (figura 5).

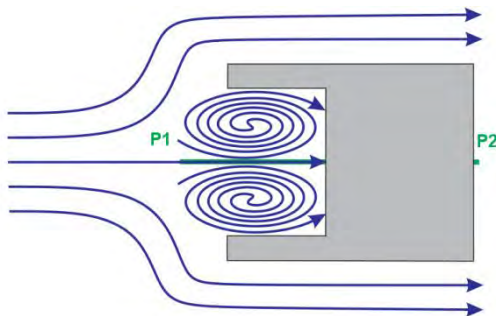


Figura 5. ROV inmóvil en un fluido ideal.

PRESIÓN ESTÁTICA Y DINÁMICA

Cuando en una corriente uniforme se introduce un cuerpo inmóvil, la corriente queda retenida inmediatamente delante del obstáculo y después se ramifica, rodeándolo, para poder seguir fluyendo. En el centro de la zona de estancamiento, al llegar la corriente al punto de remanso (P2 en la figura 6), la corriente se detiene totalmente, esto es, $v_2 = 0$.

En una línea de corriente trazada por el punto de remanso y con el punto 1 en la zona sin perturbar delante del obstáculo, se verifica la ecuación de Bernoulli, que, para el caso de igual de igual altura de los dos puntos, adopta la siguiente forma:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = 0$$

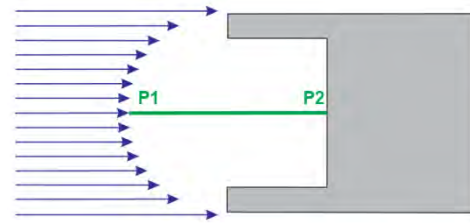


Figura 6. ROV inmóvil.

MOVIMIENTO ROTATORIO

Sea $\dot{m}$ la cantidad de fluido que fluye por segundo por los álabes del motor del ROV, y sean v_{1t} y v_{2t} las componentes tangenciales de las velocidades absolutas sobre los radios r_1 y r_2 . El momento de rotación transferido por el motor al fluido será:

$$M = F \cdot r = \frac{dD}{dt} = \frac{m}{t} (r_2 \cdot v_{2t} - r_1 \cdot v_{1t})$$

$$M = \dot{m}(r_2 \cdot v_{2t} - r_1 \cdot v_{1t}) \text{ Ec. 2}$$

Detrás de los álabes del motor se forma una corriente-fuente en un espacio anular cilíndrico, lo que permite el desplazamiento del ROV (figura 7).

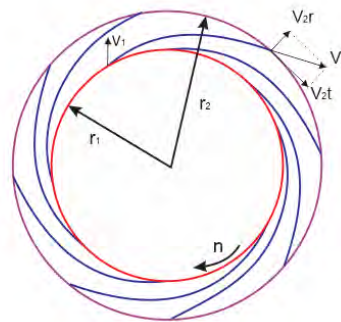


Figura 7. Corriente en el motor del ROV.

CIRCULACIÓN

En el óvalo de la figura 9, el punto inicial coincide con el final y, por tanto, esta curva constituye una línea cerrada. Al valor de la integral curvilínea en esa curva cerrada se le denomina circulación Γ [4].

$$\Gamma = \oint v \cdot \cos \alpha \cdot ds \text{ Ec. 3}$$

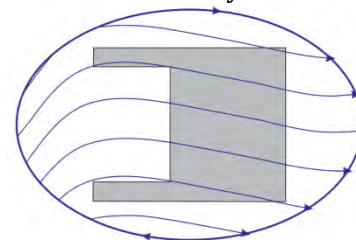


Figura 8. Circulación de corriente en el ROV.

EFECTO MAGNUS

Por efecto Magnus se conoce el fenómeno físico por el cual la rotación de un objeto afecta a la trayectoria del mismo a través de un fluido, en particular, el aire. Es producto de varios fenómenos, incluido el principio de Bernoulli y el proceso de formación de la capa límite en el fluido situado alrededor de los objetos en movimiento (figura 9).

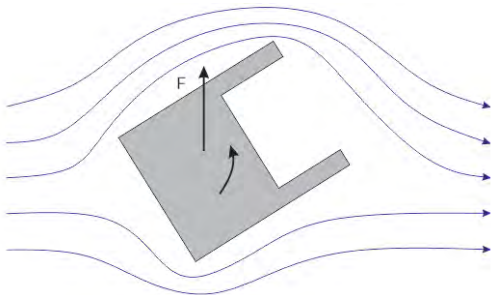


Figura 8. ROV girando en un fluido.

Hidrodinámica de fluidos reales

A diferencia de un fluido ideal, un fluido real es capaz de ocasionar fuerzas de arrastre y presenta rozamientos internos y externos.

La resistencia que aparece entre dos partículas o dos capas de fluido se denomina *rozamiento interno*. A la fuerza de arrastre se le llama *viscosidad*; a las fuerzas existentes entre el fluido y las superficies materiales entre las cuales se mueve el fluido se les denomina *rozamiento externo*.

Viscosidad

Viscosidad es la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales y es debida a las fuerzas moleculares de cohesión. Todos los fluidos conocidos presentan algo de viscosidad, y el modelo de viscosidad nula constituye una aproximación bastante buena para ciertas aplicaciones (figura 9) [5].

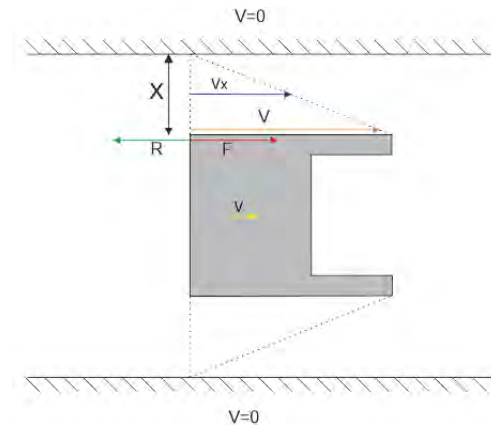


Figura 9. Desplazamiento del ROV en medio de dos placas, por efecto de la viscosidad.

$$F = R$$

$$F = R = \mu \cdot A \cdot \frac{dv_x}{dx}$$

$$\frac{R}{A} = \mu \cdot \frac{dv_x}{dx} = \tau, \text{ fuerza de arrastre. Ec. 4}$$

Simulación y análisis mecánico

Según [6], la simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias –dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos– para el funcionamiento del sistema. En la figura 10 se muestra la simulación del vehículo.

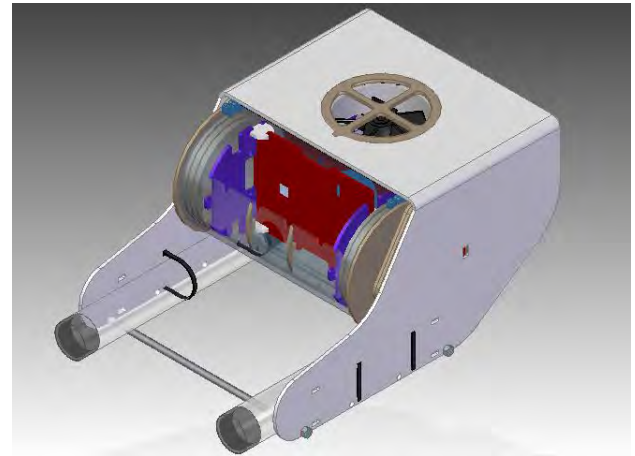


Figura 10. Simulación del Open ROV V2.6 .

A continuación, se presentan los resultados de la simulación para efectos de presión, y deformación por esta causa, sobre las partes principales del vehículo, cuando este se encuentre operando a 2 m de profundidad en agua dulce y condiciones laminares del sistema.

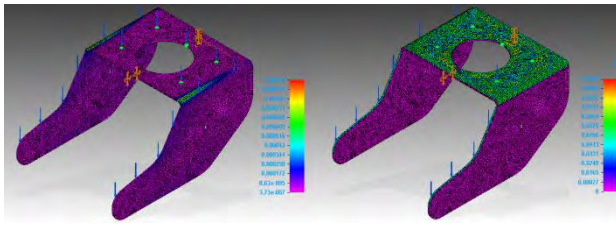


Figura 11. Chasis: Deformación – Presión.

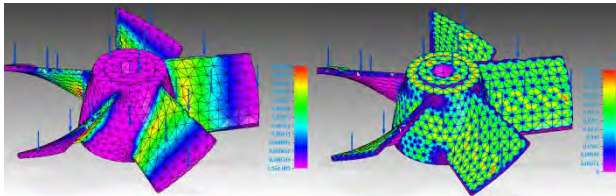


Figura 12. Álabes motor superior. Deformación – Presión.

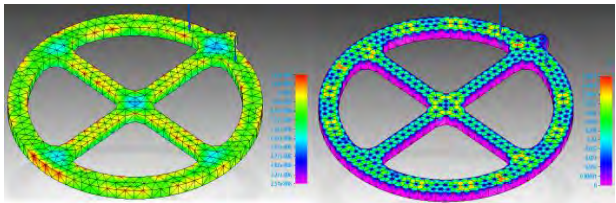


Figura 12. Álabes motor superior. Deformación – Presión.

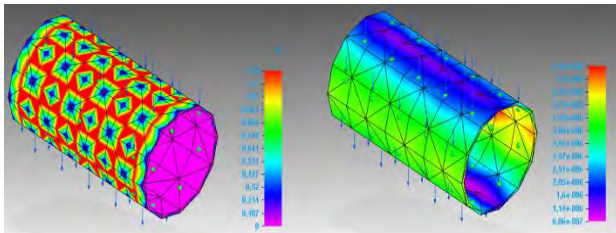


Figura 13. Tubo componentes electrónicos. Deformación – Presión.

Simulación y análisis de elementos de control

Luego de simular el prototipo en 3D y de realizar el respectivo análisis por elementos finitos, se procede al desarrollo de una simulación, en Matlab, en entornos de realidad virtual. Primero se integra el modelo del *toolbox* de Matlab, destinado para la edición de elementos de este tipo, que luego se integrarán con Simulink (figura 14).

En este modelo se integran las restricciones tanto de rotación como de traslación para realizar el movimiento en 2 dimensiones, en el plano XY, puesto que aún no se considerarán los efectos del movimiento en tres dimensiones.

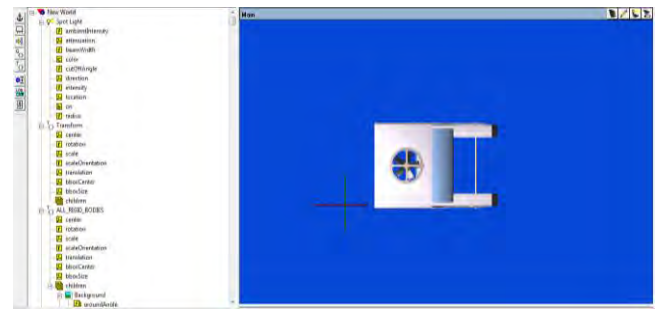


Figura 14. Modelo integrado en Vrealm Builder (*toolbox* realidad virtual Matlab)

Posteriormente, en Simulink se implementa un modelo del comportamiento de los motores, en el cual se obtiene la reacción de los mismos (torque) de acuerdo con una variación de tensión en la entrada (figura 15).

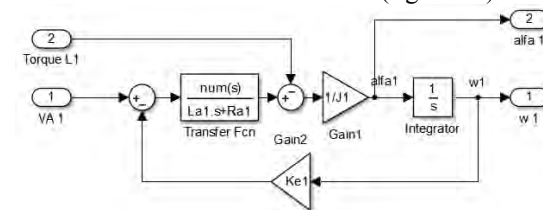


Figura 15. Modelo motor DC en Simulink [6].

Además, se implementó un modelo para observar el comportamiento en el plano XY (figura 16). Este modelo es similar al usado en modelos de robótica móvil, excepto porque en este caso aún no se consideran los efectos por cuenta de la profundidad dl agua, ni los que se producen por la fricción viscosa o el posible oleaje, aunque son factores que se deberán tener en cuenta a la hora de hablar de mejoras en el modelo.

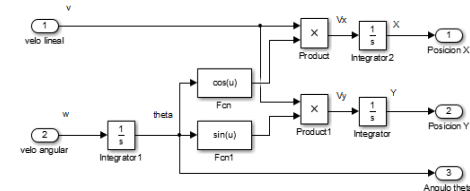


Figura 16. Modelo en dos dimensiones, en Simulink, de posicionamiento del robot [7], [8].

Luego de obtenidos los dos modelos anteriores, se les usa simultáneamente (figura 17) para observar el comportamiento del prototipo en una simulación en condiciones ideales. Esto es posible mediante la integración de los mismos en un solo elemento en el cual, de acuerdo con las variaciones de los motores, se realiza un posicionamiento del mismo.

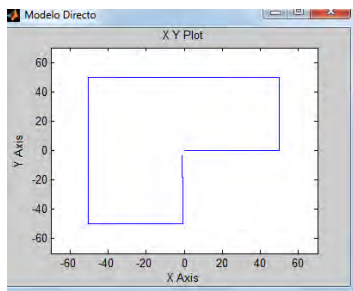


Figura 22. Visualización de posiciones de acuerdo con la entrada de las señales

[8] J. J. Craig, *Robótica*. Traducido por Alfonso Vidal Romero Elizondo, 3ª. ed., México D.F.: Pearson Educación, ISBN 970-26-0772-8, 2006.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El presente no es un trabajo finalizado; por lo tanto, se debe asumir el hecho de que aún hay factores que no se han tomado en cuenta, pero de los que se tiene la certeza de que serán usados en las etapas siguientes de desarrollo del proyecto.
- Planteando los aspectos básicos de la mecánica de fluidos, para una próxima etapa se obtendrá un modelo hidrodinámico que muestre el comportamiento del sistema cuando este se encuentre en un entorno acuático.
- El análisis de elementos finitos que se presentó es solo la fase inicial del modelamiento, debido a que solo se tiene en cuenta un fluido laminar y estático. En la fase posterior se abordarán efectos viscosos, turbulentos y navegación en diferentes ambientes.
- El modelamiento y desarrollo de una etapa posterior, que incluya el modelo completo para el control del dispositivo, debe contar con algunos elementos referentes a las no linealidades presentes en medios subacuáticos.
- El modelo completo deberá aportar información para el mejoramiento de los parámetros de simulación; además deberá ofrecer una realimentación para optimizar el comportamiento real del prototipo.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Ruiz, "Diseño de un sistema de control autónomo para un vehículo submarino AUV", U. P. de Catalunya, p. 18, 2009
- [2] <http://openrov.com/>
- [3] Y. Cengel, y J. Cimbala, *Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones*, 2006.
- [4] W. Kalide, *Introducción a la hidrodinámica técnica*, vol. V., Bilbao, 1965.
- [5] F. White, *Fluid mechanics*. Vol. V, New York, 2003.
- [6] G. R. Bermúdez, y M. L. Pinto, "Estudio y modelado de una plataforma robótica móvil diferencial". En: *Colombia. Ingeniería, investigación y desarrollo* ISSN: 1900-771X Editorial UPTC, v.5, fasc.1, pp. 20-24, 2008.
- [7] A. Ollero, *Robótica. Manipuladores y robots móviles*. Barcelona: Marcombo, ISBN 84-267-1313-0, 2001.

ROBOT TRANSPORTADOR OMNIDIRECCIONAL

Omnidirectional Robot Carrier

RESUMEN

El presente artículo presenta los criterios de diseño para la construcción de un robot omnidireccional, a partir del planteamiento de modelos matemáticos, como el modelo cinemático directo e inverso, con lo cual es posible interpretar qué tipo de desplazamiento posee el robot y bajo cuáles circunstancias se da dicho desplazamiento. Igualmente, establece el estudio de la resistencia del material que permite conocer si el material con el cual se pretende construir la estructura es lo suficientemente resistente para soportar no solo su propio peso, sino también el del objeto que debe transportar y, finalmente, la Segunda Ley de Newton, con el fin de establecer la fuerza que deben ejercer los actuadores para vencer la fuerza de fricción y la velocidad que poseen, ya que estos parámetros le permitirán al robot desplazarse. Así como el esquema de control general del proyecto y de los motores.

Palabras clave: Modelos cinemáticos, resistencia de los materiales, fuerza normal, fuerza de fricción.

ABSTRACT

This article shows the design criteria for the construction of an omnidirectional robot, from mathematical modeling approach, such as the direct and inverse kinematic model, with which it is possible to interpret that kind of displacement has the robot and under what circumstances is said movement, the study of the resistance of the material that allows knowing if the material which is intended to build the structure is strong enough to bear not only its own weight but also the object to be transported and finally the Second Law Newton, to set engine power must exert to overcome the friction alforce and speed that have applied, as these parameters will enable the robot move. Well as the control scheme of the project and the engines.

Keywords: Kinematic models, material strength, normal force, frictional force.

1. INTRODUCCIÓN

Un robot omnidireccional se caracteriza porque puede moverse en cualquier dirección [1] sin necesidad de reorientación, debido a que utiliza ruedas omnidireccionales, las cuales constan de una rueda normal con rodillos ubicados de forma perpendicular a la dirección normal de la rueda. Entonces, cuando se aplica una fuerza lateral, el robot se desplaza sobre los rodillos, lo que permite que haya una componente de velocidad en el eje x.

2. MODELO CINEMÁTICO

El modelo cinemático de este tipo de robot se define a partir de un triángulo equilátero en el cual se ubica una rueda en cada uno de sus vértices y, por consiguiente, cada rueda posee entre sí un ángulo de separación de 120 grados [2] como se muestra en la figura 1. Ahora, la distancia del centro de las ruedas al centro del triángulo se denota como L , la velocidad angular de cada rueda se

representa como ω_1 , ω_2 , ω_3 y por último esta r que hace referencia al radio de las ruedas.

Donde los ángulos θ_1 , θ_2 , y θ_3 toman los siguientes valores de acuerdo a su ubicación en el triángulo equilátero:

$$\theta_1 = 0^\circ ; \quad \theta_2 = 30^\circ ; \quad \theta_3 = 150^\circ$$

$$L = 0.1748 \text{ m}$$

$$r = 0.12 \text{ m}$$

LUIS BARRERO

Ingeniero Electrónico, M.Sc.
Profesor Facultad de Ingeniería.
Universidad de San Buenaventura.
lubarrero@usbog.edu.co

ANDRÉS VILLEGAS

Ingeniero de Proyectos
Energía Integral Andina S.A.
andres.villegas@energíaintegralandina.com

DIANA GÓMEZ

Ingeniera Electrónica
Account Manager
Edicom S.A.S
dgomez@edicomgroup.com

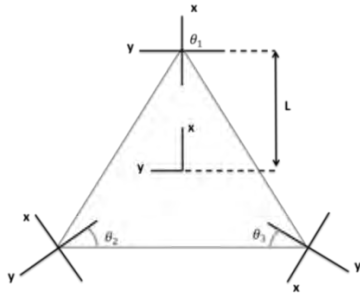


Figura 1. Esquema de la posición de las ruedas en un sistema de locomoción omnidireccional con tres ruedas.

Dicho modelo cinemático se presenta de dos formas: directa e inversa. De la primera se obtiene el desplazamiento y posición del robot con respecto a los ejes x, y, z , a partir de la velocidad angular de las ruedas. Mientras que de la segunda se obtiene la velocidad angular de las ruedas a partir de la posición del robot y de su desplazamiento con respecto a los ejes de coordenadas. Sin embargo, antes de realizar el análisis es necesario fijar unos parámetros, como la dirección de giro de las ruedas cuando se desplaza hacia delante, teniendo en cuenta su disposición [3]. En este caso, para las ruedas 1 y 2, el giro es positivo cuando se realiza en contra de las manecillas del reloj, mientras que la rueda 3 cuando giran en el sentido contrario a las manecillas del reloj, consideramos el giro con signo negativo y viceversa, como se muestra en la figura 2.

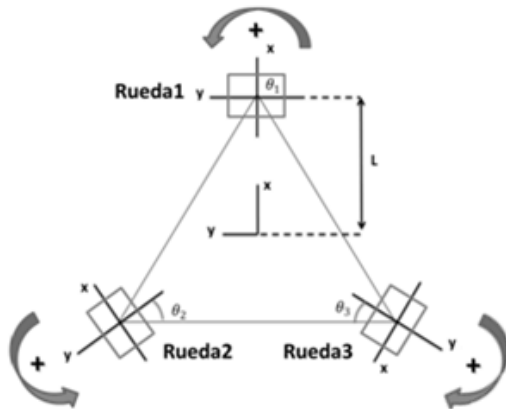


Figura 2. Convención de signos respecto a la dirección de giro de cada rueda cuando el robot se desplaza hacia delante.

Por otro lado, en el caso en que el robot gira sobre su propio eje, en el sentido de las manecillas del reloj, este se considera como un movimiento con signo negativo y si se presenta el caso contrario, entonces será un movimiento con signo positivo.

A continuación, se encuentran las matrices y ecuaciones que describen el modelo cinemático directo e inverso de un robot omnidireccional.

2.1. Modelo cinemático directo

A partir del modelo cinemático directo es posible conocer cuánto debe avanzar, sobre cuál eje de coordenadas y en cuál sentido gira cada una de las ruedas con respecto a las otras.

Para este cálculo se tiene el vector de posición Ap y el vector de velocidad angular φ [4], los cuales aplican para el modelo directo e inverso y están dados como:

$$Ap = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\varphi = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Ahora, para hallar el vector posición se aplica la siguiente matriz:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \frac{r}{3} * \begin{bmatrix} \sin \theta_1 & 2\cos \theta_2 & -2\cos \theta_3 \\ -2\cos \theta_1 & 2\sin \theta_2 & 2\cos \theta_3 \\ -1/L & -1/L & -1/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

A partir de la ecuación (3) se deducen las ecuaciones para hallar las coordenadas y el desplazamiento en x, y, z .

$$x = (\omega_1 \sin \theta_1 + \omega_2 2\cos \theta_2 - \omega_3 2\cos \theta_3) * \frac{r}{3} \quad (4)$$

$$y = (-\omega_1 2\cos \theta_1 + \omega_2 2\sin \theta_2 + \omega_3 2\cos \theta_3) * \frac{r}{3} \quad (5)$$

$$z = (-\omega_1 1/L - \omega_2 1/L - \omega_3 1/L) * \frac{r}{3} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \frac{r}{3} * \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ -2 & 1 & 1 \\ -1/L & -1/L & -1/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Dichos valores se obtienen reemplazando el ángulo correspondiente a la inclinación de cada una de las ruedas, respecto al eje de coordenadas.

Por lo tanto, para hallar el desplazamiento de cada una de las ruedas se reemplaza en las ecuaciones (4), (5), (6) cada uno de los resultados obtenidos en la matriz, según corresponda y el valor de L , la cual depende del tamaño del robot.

En este orden de ideas, la ecuación. (7) representa el modelo cinemático directo, de la cual se concluye que el desplazamiento de la rueda 1 se rige por los valores que se encuentra en la primera columna de izquierda a derecha de la matriz 3×3 , la rueda 2 se rige por la

segunda columna y la rueda 3 por la tercera. Además, también muestra que el valor que toma x corresponde a la primera fila de arriba hacia abajo, y a la segunda fila, y z a la tercera fila como se observa en las ecuaciones. Por lo tanto, para hacer el análisis del desplazamiento se asignan valores a las variables correspondientes a la velocidad angular de cada una de las ruedas; es decir, a $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ [4].

Inicialmente, se determina el desplazamiento de las ruedas cuando el robot rota sobre sí mismo, asignando los siguientes valores a las variables de velocidad angular.

$$\begin{aligned}\omega_1 &= 1 \\ \omega_2 &= 1 \\ \omega_3 &= 1\end{aligned}$$

A continuación, se reemplazan los valores de w en las ecuaciones (4), (5), (6), de lo cual se obtiene que:

$$x = \left((1*0) + (1*\sqrt{3}) + (1*(-\sqrt{3})) \right) * \frac{0.12m}{3} = 0m$$

$$y = \left(-(1*2) + (1*1) + (1*1) \right) * \frac{0.12m}{3} = 0m$$

$$z = \left(-\frac{1}{0.1748m} - \frac{1}{0.1748m} - \frac{1}{0.1748m} \right) * \frac{0.12m}{3}$$

$$z = -0.68m$$

Como se observa en los resultados, si reemplazamos la velocidad angular para cada rueda con una unidad positiva se obtiene solo el resultado de la componente en z , la cual corresponde a la rotación del robot, con signo negativo, lo que significa que el robot gira hacia la derecha; es decir, en el sentido de las manecillas del reloj, como muestra la figura 3.

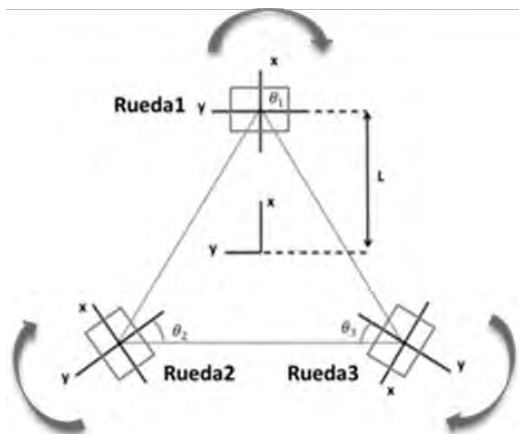


Figura 3. Rotación del robot en sentido horario.

Ahora, si se desea conocer el desplazamiento del robot hacia adelante solo se reemplaza el valor de ω_2 y ω_3 , que corresponden a la rueda 2 y 3 respectivamente e incluimos el sentido de la rotación de cada rueda por medio del signo. A la rueda 1 se le asigna el valor de cero, debido a que se desplazará sobre los rodillos que posee; es decir, que será “arrastrada” por el movimiento de los motores conectados a las ruedas 2 y 3.

$$\begin{aligned}\omega_1 &= 0 \\ \omega_2 &= 1 \\ \omega_3 &= -1\end{aligned}$$

□

$$x = \left(0 + (1*\sqrt{3}) + (-1*(-\sqrt{3})) \right) * \frac{0.12m}{3} = 0.14m$$

$$y = (0 + 1 - 1) * \frac{0.12m}{3} = 0m$$

$$\omega = \left(0 - \frac{1}{0.1748m} + \frac{1}{0.1748m} \right) * \frac{0.12m}{3} = 0m$$

Entonces, se observa en los resultados que el robot se desplaza solo sobre el eje x 0.14m; es decir, alrededor de 14 cm como se muestra en la figura 4.

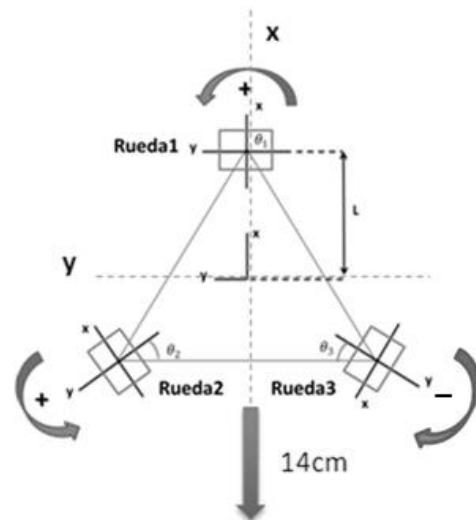


Figura 4. Desplazamiento hacia adelante del robot.

2.2. Modelo cinemático inverso

A partir del modelo cinemático inverso es posible conocer la velocidad angular y el sentido de giro que debe tener cada una de las ruedas con respecto a las otras.

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta_1 & -\cos \theta_1 & -L \\ \cos \theta_2 & \sin \theta_2 & -L \\ \cos \theta_3 & \sin \theta_3 & -L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\omega_1 = (x \sin \theta_1 - y \cos \theta_1 - Lz) * \frac{1}{r} \quad (9)$$

$$\omega_2 = (x \cos \theta_2 + y \sin \theta_2 - Lz) * \frac{1}{r} \quad (10)$$

$$\omega_3 = (x \cos \theta_3 + y \sin \theta_3 - Lz) * \frac{1}{r} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{r} * \begin{bmatrix} 0 & -1 & -L \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & 0.5 & -L \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0.5 & -L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (12)$$

Dichos valores se obtienen reemplazando el ángulo correspondiente a la inclinación de cada una de las ruedas respecto al eje de coordenadas.

Por lo tanto, para hallar la velocidad angular para cada una de las ruedas se reemplaza en las ecuaciones (9), (10), (11) cada uno de los resultados obtenidos en la matriz, según corresponda y el valor de L , la cual depende del diseño del robot.

En el caso de la ecuación (8) del modelo cinemático inverso, la velocidad angular de la rueda 1 se rige por los valores que se encuentran en la primera fila de la matriz 3x3, donde el valor que toma x corresponde a la primera columna de izquierda a derecha, y a la segunda columna y z a la tercera.

Por lo tanto, para realizar el análisis de la velocidad angular se asignan valores a las variables correspondientes a la posición en x , y , z del robot [4].

Ahora, se determina la velocidad angular de las ruedas cuando el robot rota sobre sí mismo, asignando los siguientes valores a las variables de posición.

$$\begin{aligned} x &= 0 \\ y &= 0 \\ z &= -1 \end{aligned}$$

Y se reemplaza en las ecuaciones. (9), (10), (11).

$$\omega_1 = (0 + 0 + 0.1748\text{m}) * \frac{1}{0.12\text{m}} = 1.456$$

$$\omega_2 = (0 + 0 + 0.1748\text{m}) * \frac{1}{0.12\text{m}} = 1.456$$

$$\omega_3 = (0 + 0 + 0.1748\text{m}) * \frac{1}{0.12\text{m}} = 1.456$$

Como se observa en los resultados, si reemplazamos los componentes de la posición del robot, se obtiene la velocidad angular para cada una de las ruedas cuando el robot gira sobre sí mismo.

Ahora, si se desea conocer la velocidad angular de las ruedas involucradas en el desplazamiento del robot hacia delante, solo se reemplaza el valor de x , y y z en la ecuación de las ruedas 2 y 3, ya que la rueda 1 se desplazará sobre los rodillos que posee. Tampoco se incluye el valor de z , debido a que el robot no va girar sobre sí mismo.

$$\begin{aligned} x &= 1\text{m} \\ y &= 0 \\ z &= 0 \end{aligned}$$

$$\omega_2 = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \text{m} * \frac{1}{0.12\text{m}}$$

$$\omega_2 = 7.21$$

$$\omega_3 = \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \text{m} * \frac{1}{0.12\text{m}}$$

$$\omega_3 = -7.21$$

Por lo tanto, como se ve en los resultados para que el robot se desplazase hacia delante, se requiere que la magnitud de la velocidad angular sea la misma para las ruedas 2 y 3.

Sin embargo, para conseguir que el robot realice el desplazamiento deseado, el modelo matemático del mismo debe apoyarse en la lectura de los encoders, para lograr un sistema realimentado.

3. DISEÑO CAD DEL ROBOT

Para la elaboración del diseño en 3D del robot es necesario definir las dimensiones que tendría, las cuales deben ser lo más reales posibles [5]. Para este caso por razones funcionales y estéticas se decidió que el robot tuviese una forma hexagonal de forma que, independientemente como se desplace, luzca igual.

De igual manera, es necesario conocer unos parámetros base para el diseño de un robot omnidireccional como los mencionados a continuación:

- Cómo se desplace (modelo cinemático).
- Tipos de ruedas (dimensiones).
- Resistencia del material (para la simulación y fabricación del robot).

- Tipos de actuadores del sistema (motores, sensores [6], etc.).
- Elementos electrónicos y eléctricos necesarios para su funcionamiento (baterías, transistores, microcontroladores, etc.).

A partir de dichos elementos es posible conocer todos los elementos necesarios para desarrollar un modelo en 3D y posteriormente pasar a la fabricación del robot. Por ejemplo, dependiendo de los motores que se utilizarán se deben tener en cuenta rodamientos, soportes para los mismos y el eje del motor. En conclusión, todo el sistema de transmisión que permita la movilidad del motor.

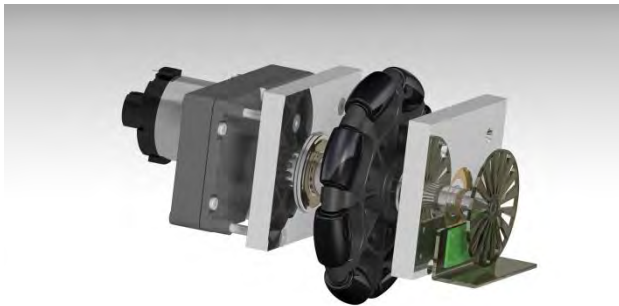


Figura 5. Configuración ruedas omnidireccionales CAD.



Figura 6. Diseño rueda omnidireccional CAD.



Figura 7. Diseño Final CAD.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para la elaboración fue vital entender a fondo el funcionamiento del sistema de locomoción de un robot omnidireccional teniendo un modelo matemático que lo soporte, ya que esto permite predecir el desplazamiento del robot en un sistema de coordenadas, así como también permite determinar la velocidad angular con la que deben trabajar los motores, para lograr que el robot se desplace en la forma deseada, lo cual, a la hora de programar el prototipo, facilita dicho proceso, ya que las ecuaciones y los resultados obtenidos del modelo cinemático se pueden incorporar dentro del programa como un algoritmo, y hace más eficaz el control, sobre todo de los motores, ya que es posible conocer cuánto se debe desplazar el robot y a qué velocidad para lograr su objetivo.

En cuanto al diseño en 3D, este fue fundamental para la simulación del prototipo y para la construcción y fabricación del mismo. El diseño esquemático relacionando el proceso que se tuvo en la medida en que el dispositivo fue siendo concebido.

También se tuvo en cuenta para el diseño del prototipo del robot modelos matemáticos y físicos como la Segunda Ley de Newton y cálculos de resistencia de los materiales, así como teoría de motores en DC y sensores.

A raíz de los resultados, se observó que es necesario aplicar una mayor fuerza cuando se desea mover un cuerpo que se encuentra en reposo que uno que ya se encuentra en movimiento.

Finalmente, de las pruebas realizadas al robot se puede concluir que:

- Es exacto en un rango de 40% a 60% en cuanto a la medición de la masa del objeto que transporta.
- Es eficaz en la elección de las rutas según la masa del objeto.

- No es preciso en cuanto a su desplazamiento, pues este no ocurre del todo en línea recta, pero la forma en que llega a la meta siempre es la misma, así que posee un desplazamiento repetitivo.
- Es preciso en un rango de 50% a 60% en cuanto a su ubicación después de girar ya sea hacia la izquierda o hacia la derecha.
- Es exacto en un 80% respecto a la detección de obstáculos.

Para garantizar la presión en la ejecución de la ruta, se podría utilizar un odómetro que funcione de manera conjunta con los *encoders*. Además de asegurar la exactitud de los giros en un mayor porcentaje o incluso en su totalidad.

Finalmente, para la detección de obstáculos es posible implementar una cámara que permita identificarlo y así el robot en vez de detenerse, logre evadirlo.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. G. Pin and S. M. Killough, *A New Family of Omni-Directional and Holonomic Wheeled Platforms for Mobile Robots*, IEEE Trans. Rob. Autom., 10_4_, pp 480-489.
- [2] WUC, Jianhua, WILLIAMS, Robert L, *Velocity and Acceleration Cones for Kinematic and Dynamic Constraints on Omni-Directional Mobile Robots*, Ohio University, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 128 / 799, United States, 2006
- [3] Liua, Yong, Zhua, Jim, Williams, Robert L., WUC, Jianhua, *Omni-directional mobile robot controller based on trajectory linearization*, Ohio University, Science Direct, Robotics and Autonomous Systems 56 (2008) 461–479.
- [4] L. García, *Modelo Cinemático y Control de Robots Móviles con ruedas*, PhD Tesis, Universidad de Valencia, Valencia, 2008.
- [5] J. Fletcher, S. Ho, J. Kloess, R. Raj y S. Vozar. *Round a Bot, holonomic Invert Pendulum Robot*. Ann Arbor. 2010.
- [6] D. S. Albán, F. R. Salazar, *Diseño e Implementación de Sensores de Temperatura, Presión y Proximidad en un Prototipo de Piel Sensible para Robots Compañeros*, Tesis de Pregrado, Escuela Politécnica del Ejercito sede Latacunga, Latacunga, 2011.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE MATERIALES EN LAS PRÓTESIS PARCIALES PARA ARTROPLASTIA

Structural analysis of materials in partial prosthesis for arthroplasty

RESUMEN

El estudio del desgaste de las prótesis parciales en reemplazos articulares de rodilla permite la predicción de posibles puntos de falla de la estructura, que afectan su comportamiento mecánico. El enfoque del presente estudio es el análisis de esfuerzos y deformaciones en una prótesis parcial de reemplazo articular de rodilla, donde se considera el esfuerzo límite de tensión de cada pieza de la estructura, calculando el factor de seguridad y determinando los posibles puntos de ruptura. Los resultados concluyeron con valores altos de seguridad, con lo cual quedó demostrado que hay riesgos mínimos en estas prótesis.

Palabras clave: análisis de esfuerzos, artroplastia, biomateriales, componente femoral-tibial, inserto, prótesis parcial de rodilla, reemplazo articular.

ABSTRACT

The research of wear of partial prosthesis in knee joint replacements allows prediction of possible points of failure of the structure, that could affect its mechanical behavior. This study is focused in the analysis of stresses and deformations in a partial prosthetic joint replacement, considering the limit tensile stress of each part that makes up the structure, calculating the safety factor and identifying potential breakage points. The results concluded with high security settings, demonstrating minimal risk in the prosthesis.

Keywords: arthroplasty, biomaterials, femoral component, joint replacement, partial knee prosthesis, tibial component, tibial insert.

1. INTRODUCCIÓN

La artroplastia es una operación quirúrgica que tiene como objetivo restaurar de manera efectiva el movimiento articular de tejidos blandos dependientes de una determinada articulación [1]. Este tipo de cirugía puede realizarse de manera parcial o total, de acuerdo con la condición o el nivel de daño que presenten las articulaciones del paciente [2]. En el caso de la rodilla, el método empleado se basa en la extracción del cartílago y una parte del hueso afectado en la articulación de la rodilla, con el propósito de remplazarlos por piezas sintéticas, comúnmente llamadas *prótesis*.

En general existen tres causas que originan la falla o daño de la articulación de la rodilla: la osteoartritis, que consiste en el desgaste y pérdida progresiva del cartílago óseo, que a su vez generan desviaciones en varo o valgo¹; la segunda causa es la artritis reumatoide, producida por los anticuerpos contra la sinovia y que ocasiona

reacciones inflamatorias, además de dañar de forma agresiva los cartílagos; el tercer causante es la artrosis postraumática, que es el desgaste acelerado del cartílago producido por un antecedente traumático en la rodilla, quizá una lesión de tipo deportivo, un accidente de tránsito, fracturas, entre otros [3].

Actualmente, con el fin de mejorar las condiciones del paciente luego de la cirugía, se han incrementado los estudios sobre la falla, el desgaste y la vida útil de los mecanismos implantados [4], [5], [6] durante el reemplazo parcial o total de las articulaciones que soportan cargas o presiones cíclicas de alta intensidad y duración [1].

La problemática que se presenta habitualmente en las prótesis o implantes de la articulación de la rodilla consiste en el desgaste progresivo y el adelgazamiento del material [7]. Este fenómeno es conocido como *osteolisis*, definido en [4] como el deterioro y adelgazamiento de los huesos producido por las partículas micrométricas y submicrométricas de desgaste de los materiales implantados (también se le llama *degradación oxidativa*) [4]. En su mayoría se trata de

KARIN MUÑOZ

Ingeniero en Mecatrónica
Asistente investigador
Universidad Militar Nueva Granada
U1801301@unimilitar.edu.co

OLGA RAMOS

Ingeniero electrónico, Ph.D. (c).
Docente e investigador
Universidad Militar Nueva Granada
olga.ramos@unimilitar.edu.co

¹ Varo y valgo son denominados los movimientos de abducción y aducción de una articulación [1].

implantes metálicos para el fémur y la tibia hechos de aleaciones de titanio o acero inoxidable, y el material del inserto es polietileno de ultraalto peso molecular (UHMWPE), materiales, ambos, considerados de alta compatibilidad [7], [8].

Además de lo anterior, se ha observado que los fagocitos, células presentes en el organismo, capaces de eliminar restos celulares durante la disolución de las partículas generadas por el polietileno, liberan mediadores – citoquinas– que inducen la resorción ósea, lo cual genera a mediano plazo el aflojamiento protésico [6], [7], [8].

De acuerdo con el anterior planteamiento de la problemática de los reemplazos articulares de rodilla, se realizó el estudio y análisis del desgaste de las partes femorales, tibiales y del inserto implantados en la rodilla del ser humano, basados en estudios anteriores de reemplazo parcial articular de rodilla [3], [4], [6], [9].

2. COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS MATERIALES USADOS EN EL REEMPLAZO PARCIAL ARTICULAR DE RODILLA

La rodilla es una articulación que tiene como función otorgar estabilidad o equilibrio en el cuerpo humano, además de la transmisión de movimiento [10]. Debido a las altas cargas que debe soportar y a enfermedades asociadas con la edad o el desgaste de las articulaciones, se hace necesario intervenir a los pacientes para corregir este tipo de alteraciones. Para lograrlo, es adecuado implantar prótesis articulares que actúen de la misma forma que las partes afectadas [11].

Se ha hecho un considerable análisis de los materiales que componen las prótesis femorales, tibiales e inserto, usadas en la artroplastia parcial de rodilla (también comúnmente llamado reemplazo articular parcial de rodilla). Además, se ha analizado el comportamiento de dichas piezas cuando soportan cargas que varían de forma cíclica con el tiempo [9].

Los materiales usados en dichos implantes son: a) aleaciones de titanio –Ti₆Al₄V– en los componentes femorales y tibiales; y b) Polietileno de ultraalto peso molecular –UHMWPE– en reemplazo de meniscos y ligamentos (este reemplazo también es llamado inserto tibial) [12], [13], [14], [15]. Algunas de las características de estos componentes se muestran en las tablas 1 y 2.

Propiedad	
Densidad [g/cm ³]	4,43
Resistencia última a la tracción [MPa]	950 MPa
Módulo de elasticidad o módulo de Young [GPa]	113,8
Coefficiente de Poisson	0,342
Resistencia a la fatiga	240 MPa

Tabla 1. Propiedades del Ti₆Al₄V [16].

Propiedad	Método de prueba	
Densidad [g/cm ³]	D792	0,93
Resistencia a la tracción [MPa]	D638	23
Módulo de elasticidad o Módulo de Young [MPa]	D638	725
Módulo de tracción [MPa]	D638	827,3

Tabla 2. Propiedades del UHMWPE [17].

El comportamiento mecánico de los materiales Ti₆Al₄V y UHMWPE se expresa, al igual que otros, en función de los esfuerzos y deformaciones que se producen cuando se ven sometidos, de forma constante, a una o varias cargas. Como se mostró en las tablas 1 y 2, las principales propiedades mecánicas son la rigidez, la elasticidad y la resistencia.

Las propiedades de los materiales dependen de su constitución y estructura [18]; es por esto que se comportan de acuerdo con las ecuaciones de esfuerzo, deformación y factor de seguridad de un material, como se muestra, en (1) y (2).

$$\sigma = P/A \quad (1)$$

$$\varepsilon = e/L \quad (2)$$

$$F_s = \frac{\sigma_{ult}}{\sigma_{adm}} \quad (3)$$

donde ε es la deformación unitaria, e la deformación, L la longitud del elemento, σ es el esfuerzo, P la fuerza y A el área. Con las anteriores ecuaciones es sencillo hallar los parámetros que delimitan el comportamiento de los materiales, con el objetivo de predecir puntos de fallas y prevenir una posible rotura, en este caso de las prótesis. Estas características de los materiales son importantes en el campo de la medicina porque ayudan al médico a conocer cuándo debe realizarse el reemplazo de alguna de estas prótesis.

3. ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS DE LA PRÓTESIS PARCIAL

Para la construcción del modelo fue necesario generarlo en un programa de diseño asistido por computadora, en el que se asignaron las dimensiones del mismo, de acuerdo con los valores conocidos de componentes femorales, tibiales e inserto, como se muestra en las figuras 1, 2 y 3. El ensamble total de la reconstrucción de la rodilla con su prótesis parcial se puede ver en la figura 4.

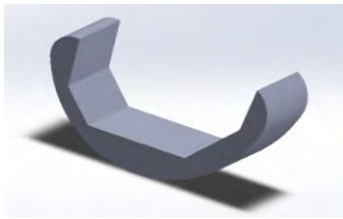


Figura 1. Componente femoral



Figura 2. Inserto o menisco



Figura 3. Componente tibial

En la figura 4 se muestran los componentes utilizados en el reemplazo articular parcial de rodilla, y en estese observa, al igual que en la artroplastia parcial de rodilla, la extracción y reemplazo de tejido y de hueso dañado de la articulación.



Figura 4. Ensamble de prótesis parcial de rodilla

Posteriormente, en el programa ANSYS® se realizó la construcción de la malla de cada uno de los sólidos y el reconocimiento de las identidades en la elaboración de las piezas, y se asignaron los materiales ya mencionados. Así, para el componente femoral y tibial se utilizó la aleación de titanio Ti_6Al_4V , y en el inserto se aplicó el material UHMWPE.

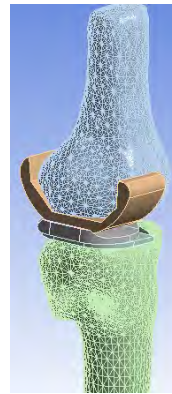


Figura 5. Malla de las piezas de la rodilla

En el modelo biomecánico virtual se colocó el soporte en la cara inferior del componente tibial, como se muestra en la figura 6, el cual limitó su desplazamiento respecto a los ejes coordenados.

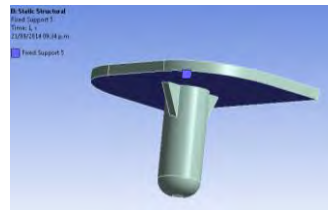


Figura 6. Soporte del componente tibial

Adicionalmente, se agregaron los contactos entre las superficies del fémur (componente femoral), la tibia (componente tibial) y el inserto. Estos contactos con mínima fricción proporcionan al componente femoral un mejor deslizamiento respecto al inserto, como se muestra en las figuras 7 y 8.

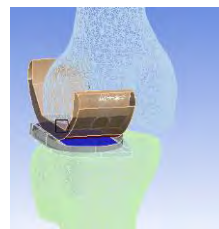


Figura 7. Contacto entre las superficies del componente femoral y el inserto

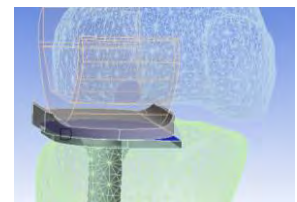


Figura 8. Contacto entre el componente tibial y el inserto

Asimismo, se definieron las condiciones de frontera; es decir, el componente femoral se sometió a fuerzas distribuidas en toda la pieza con geometría definida y se aplicó una carga de 70 N en la cara superior de la pieza, equivalente a un peso de 7 kg, como se muestra en la figura 9.

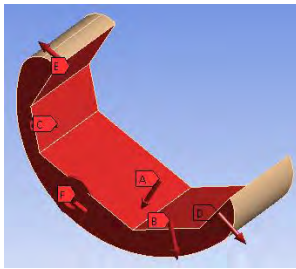


Figura 9. Aplicación de las cargas al componente femoral.

En el análisis de resultados, los esfuerzos máximos obtenidos en la estructura varían aproximadamente, en el componente tibial, entre 0,01 y 1 MPa, y en el componente femoral entre 1,052 y 14,712 MPa, como se observa en la figura 10. El mayor de estos esfuerzos se presenta en el contacto de la superficie del componente femoral y el inserto, como se muestra en la figura 11.

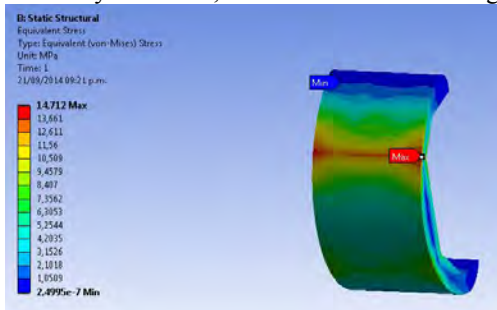


Figura 10. Máximos y mínimos esfuerzos presentados en el componente femoral.

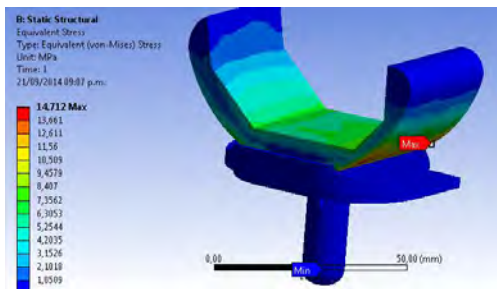


Figura 11. Esfuerzos en los componentes femorales, tibiales e inserto.

Uno de los factores importantes en el análisis del comportamiento de materiales es el estudio de la deformación que tiene el material, en este caso el polietileno de ultraalto peso molecular –UHMWPE–. Se observó que la máxima deformación al aplicar las cargas mencionadas tiende a cero y se concentra en las zonas claras de la figura 12 (a). Al igual que en el inserto, en el componente femoral las deformaciones tienden a cero y la mayor deformación presentada, en uno de los extremos de la prótesis, es de 0,023766 mm, como se muestra en la figura 12 (b).

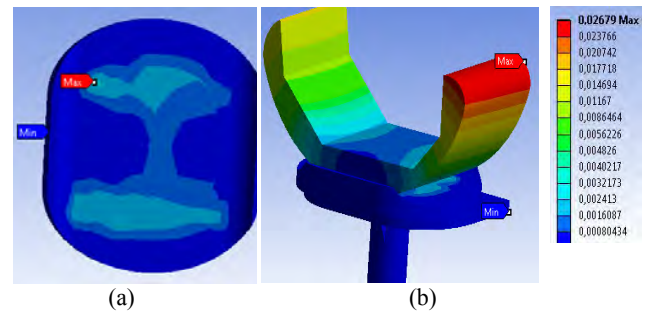


Figura 12. Deformación total del UHMWPE.

Al igual que el estudio de esfuerzos y deformaciones, el factor de seguridad desempeña un papel importante en el cálculo de la máxima capacidad de un sistema a resistir ciertas cargas [18]. En este caso se realizó un estudio de fatiga, en el que se evaluó este parámetro; se determinó que el factor de seguridad era de, mínimo, 5,859, como se muestra en la figura 13. Con este resultado se concluye que la prótesis presenta un alto grado de confiabilidad en su aplicación.

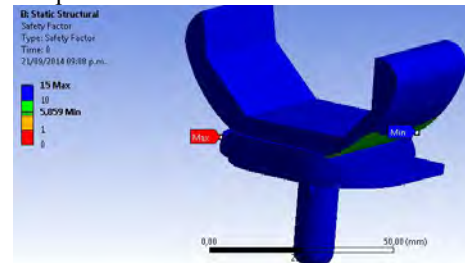


Figura 13. Factor de seguridad de la prótesis

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio aportó datos significativos en la investigación del comportamiento de las prótesis de reemplazo articular parcial de rodilla, y demostró que el factor de seguridad de los componentes femorales, tibiales y del inserto es de 5.859. Esto muestra un buen funcionamiento mecánico en cuanto a la vida útil del mecanismo.

Además, los máximos esfuerzos que presenta el componente femoral varían en un rango de 0 a 14 MPa, relativamente bajos en comparación con el límite elástico.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada por la financiación del proyecto ING 1573, año 2014.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Noriega, *Artroplastia total de rodilla. Estudio comparativo utilizando técnica estándar, técnica mínimamente invasiva, técnica estándar con navegación y técnica mínimamente invasiva con navegación*, 2012.

- [2] E. Gómez, *Biomecánica de la rodilla. Artroplastia de rodilla*, Madrid: Médica Panamericana, 1998.
- [3] P. J. Llinás, "Reemplazo total de rodilla", *Carta de la Salud*, n° 152, 2009.
- [4] J. L. Peris, F. Mollá, J. C. Navarro, C. Atienza, M. Peris, J. L. González, y J. Prat, "Análisis comparativo de desgaste de UHMWPE en un simulador simplificado de prótesis de rodilla", *Revista de Biomecánica*, n° 38, pp. 5-8, 2003.
- [5] J. C. Arellano, y H. I. Medellín, "Análisis y síntesis cinemática de un mecanismo para prótesis externa de rodilla humana", *Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, Hidalgo, 2013.
- [6] C. Atienza, M. Comín, J. L. Peris, y F. Mollá, "Evaluación del desgaste en prótesis articulares mediante simuladores", *Revista de Biomecánica*, n° 37, pp. 7-9, 2002.
- [7] C. Hernández, K. J. Moreno, A. M. Arizmendi, A. Chávez, J. F. Louvier, R. Lesso, y S. García, "Proyecto multidisciplinario para la fabricación de prótesis ortopédicas de bajo costo", *Ide@S CONCYTEG*, vol. 6, n° 72, pp. 788-798, 2011.
- [8] E. Camarena y G. Castro, "Aplicación de recubrimiento para mejorar la vida útil en insertos de polietileno del tipo UHMWPE", *Coloquio de Investigación Multidisciplinaria*, Veracruz, 2009.
- [9] A. Vidal, R. Lesso, L. Daza, y J. S. García, "Análisis y simulación de fuerzas de contacto en articulación de rodilla", *VI Conferencia Internacional de Diseño e Ingeniería Asistida por Computadora*, Guanajuato, 2006.
- [10] N. Palastanga, D. Field y R. Soames, *Anatomía y movimiento humano. Estructura y funcionamiento*, Paidotribo, 2007.
- [11] J. M. Ordóñez, y L. Munuera, *Artroplastia de rodilla*, Médica Panamericana, 1998.
- [12] J. Cymet, E. Villalobos, y J. L. Torres, "Modelos estructurales de las prótesis de rodilla", *Méx. Ortop. Traumatol*, vol. 10, n° 3, pp. 99-103, 1996.
- [13] O. García, y F. M. Muñoz, *Estudio comparativo a corto plazo de la artroplastia de rodilla con prótesis navegada (Triathlon®) y convencional (Duracon®)*, 2009.
- [14] P. Sevilla, *Biomecánica, materiales, diseño, procesos y tipos de prótesis en artroplastia de rodilla*, 2009.
- [15] L. A. García, *Análisis experimental de desgaste en polietileno de ultraalto peso molecular y acero 316-L, empleados en prótesis coxofemorales*, 2010.
- [16] G. Welsch, R. Boyer, y E. W. Collings, *Materials Properties Handbook: "Titanium alloys"*, ASTM International, 1993.
- [17] G. Wypych, *Handbook of Antiblocking, Release and Slip Additives*, ChemTec Publishing, 2005.
- [18] R. C. Hibberler, *Mecánica de materiales*, Pearson Education, 2006.
- [19] C. Merchán, *Prótesis de rodilla primaria: Estado actual*, Médica Panamericana, 2008.
- [20] J. M. López, E. Gómez, A. Larrea, E. Palacios, y J. A. Puértolas, "Estructura y morfología de las regiones degradadas del polietileno de ultraalto peso molecular en prótesis articulares", *Biomecánica*, vol. VIII, n° 13, pp. 2-11, 1999.
- [21] R. Boyer, G. Welsch, y E. W. Collings, *Materials Properties Handbook: "Titanium alloys"*, ASM International, 1993.

ORUGAS PARA LOCOMOCIÓN DE PLATAFORMAS ROBÓTICAS

Tracks for Locomotion of Robotic Platforms

RESUMEN

El presente documento muestra la evolución en el uso de orugas para la locomoción de plataformas móviles, durante la línea de investigación en vehículos militares de la serie Vali (Vehículos Antiexplosivos livianos), destacando las características de cada una, las desventajas evidenciadas durante su uso y las conclusiones para el diseño de una oruga futura.

Palabras clave: oruga, catarina, locomoción, robot móvil, Vali.

ABSTRACT

This document shows the evolution in the use of tracks for locomotion of mobile platforms, during the research on military vehicles series Vali (Anti-explosive lightweight vehicles), highlighting the characteristics of each, the drawbacks evidenced during use, and the findings to the design of a future track.

Keywords: Caterpillar, catarina, locomotion, mobile robot.

HOFFMAN F. RAMIREZ.

Ingeniero en Mecatrónica.
Estudiante Maestría en Ingeniería Mecatrónica
Universidad Militar Nueva Granada
hoffman.ramirez@unimilitar.edu.co

OSCAR F. AVILES.

Ingeniero electrónico, Ph.D.
Profesor titular
Universidad Militar Nueva Granada
oscar.aviles@unimilitar.edu.co

JUAN C. HERNÁNDEZ.

Ingeniero en Mecatrónica
Investigador
Grupo de Inv. Davinci
juankmilo8405@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de locomoción basados en orugas han sido ampliamente usados en plataformas robóticas, dadas las ventajas que ofrecen en lo referente a tracción y estabilidad [1]. Estos sistemas son usados en vehículos militares y en plataformas que requieran de una navegación en terrenos poco amigables [2]. Dentro de la gama de posibilidades disponibles para la locomoción en terrenos estructurados, existen otras opciones, las cuales poseen sus propias ventajas y desventajas, tales como los sistemas de ruedas, patas, y sistemas híbridos [2] [3]; sin embargo, estos sistemas no van a ser cubiertos durante el presente artículo.

Los robots con sistemas de orugas han sido estudiados para una gran variedad de escenarios y con múltiples configuraciones. Muestra de esto son los desarrollos que se han hecho para la exploración lunar, tal como el Nanokhod [4], plataforma robótica en miniatura que se desarrolló para ser enviada en misiones espaciales. El robot desarrollado para la misión lunar Selene-II, por la Agencia Japonesa para la Exploración Aeroespacial (JAXA por sus siglas en inglés) [5], constaba de dos pares de orugas, uno a cada lado.

Para misiones de rescate han sido desarrollados plataformas como el Souryu-I [6] y el Souryu-III [7], los cuales fueron diseñados para la búsqueda de personas que hayan quedado atrapadas en estructuras colapsadas,

requiriendo así del uso de plataformas con capacidad de navegación en terrenos reducidos.

En el campo militar, los sistemas de orugas son ampliamente usados por equipos que se comercializan hoy. Allen Vanguard [8] es una empresa dedicada al desarrollo de equipos militares para manejo de artefactos explosivos, la cual posee dentro de su portafolio de productos robots con orugas. Otro producto representativo que usa las orugas como sistema de tracción es el Talon [9], de la empresa Qinetiq, el cual ha sido usado para la neutralización de artefactos explosivos.

La línea de investigación en robótica móvil que se adelanta por el Grupo de Investigación Davinci de la Universidad Militar, el cual ha desarrollado en los últimos años tres robots de la serie Vali, cuyo fin principal es la neutralización de artefactos explosivos y cuyas plataformas móviles poseen sistemas de locomoción por orugas. En cada una de dichas plataformas, el sistema de locomoción ha sido un elemento crítico de diseño, dado que no se ha logrado el cumplimiento de todos los factores clave de este sistema.

2. SISTEMAS DE LOCOMOCIÓN POR ORUGAS

Para discutir la importancia del uso de sistemas de tracción por orugas es necesario evaluar los distintos sistemas de locomoción, teniendo en cuenta que este factor está directamente relacionado con las propiedades

geográficas del terreno a explorar, para ello hay que evaluar los siguientes aspectos [10] [11]:

- **Transitabilidad:** es la capacidad de maniobrar por un terrenos de distinta naturaleza (sitios rocosos, arenosos, lodosos).
- **Maniobrabilidad:** es la capacidad de direccionar al robot.
- **Terrenobrabilidad:** es la capacidad de sobrepasar obstáculos y mantener la estabilidad.

En la actualidad ya se han desarrollado distintos tipos y conceptos de locomoción, algunas de las características de los robots más populares se encuentran y se describen a continuación:

- **SDB** (*Swing-legged, Discrete- and Big-footed*) son los robots humanoides en general. Su estabilidad es muy crítica en terrenos no estructurado.
- **SDL** (*Swing-legged, Discrete- and Little-footed*) son Robots caminantes con 4 o más patas, tienen buena estabilidad pero su sistema y control son complejos.
- **RCL** (*Roll-legged, Continuous- and Little-footed*) son vehículos de ruedas con niveles rígidos, poseen buena estabilidad si se adaptan las ruedas y la suspensión.
- **RCB** (*Roll-legged, Continuous- and Big-footed*) son los vehículos de orugas, buena estabilidad y seguimiento, pero mala maniobrabilidad.

Gran variedad de artículos se ha escrito con el fin de describir la cinemática de un sistema de tracción por orugas, para llevar a buen término el control de la trayectoria de un robot que use este tipo de tracción. Sin embargo, la potencia, o mejor, el torque que debe entregar el motor al que se va a acoplar el sistema de tracción por orugas, se calcula teniendo en cuenta algo más que la masa del robot y los ángulos de pendiente que el mismo debe estar en capacidad de subir. De hecho, los resultados muestran que motores calculados de una forma tan sencilla, se quedan sin torque al momento de la operación del robot. No es el tema de este artículo, pues solo trata la experiencia que se obtuvo con diversas orugas, mirándolas más desde un enfoque práctico al momento de su elección y/o métodos de fabricación.

3. FACTORES CLAVE

La selección de los sistemas de orugas de las plataformas móviles de los robots Vali ha estado regida por factores clave, los cuales se han definido a lo largo del desarrollo de los proyectos en robótica del Grupo de Investigación Davinci. Durante la evaluación de los casos de estudios se van a discutir los resultados teniendo en cuenta cada uno de estos factores clave.

- **Duración de la oruga:** referente a la vida útil de la misma o de sus componentes, pues se ha evidenciado que, aunque la oruga como unidad continua, aún se mantenga apta para el uso, su labrado o sistemas de guías pueden mostrar un deterioro mayor.
- **Descarrilamiento:** este factor no debe presentarse en las orugas. Hace referencia a la posibilidad de que la oruga se pueda salir o descarrilar del sistema de guías. Dado que es un factor que se busca minimizar o anular, su calificación se debe hacer de forma inversa.
- **Transmisión de torque:** este factor garantiza que el movimiento rotacional transmitido de la catarina a la oruga, se transmita en su totalidad, sin importar qué tan alto sea el torque de entrada y la oposición que presente la oruga.
- **Agarre:** referente a la adhesión que tiene la oruga contra su superficie de apoyo, se considera que cuanto más alto sea el agarre, mejor es el sistema. Sin embargo, este factor genera mayores potencias de los motores para el movimiento del sistema.

4. CASOS DE ESTUDIO

Se van a comparar los tres robots desarrollados: Vali 1.0, Centinela 1.0 y Vali 2.0. En cada uno de ellos, el sistema de tracción es diferente, así como las orugas.

Robot Vali 1.0

Para este robot (figura 1) se adquirieron las orugas, con sus respectivas catarinas, a un fabricante fuera de Colombia. El resto del sistema, comprendido de patines de apoyo, sistema de tensión y de soporte, fue diseñado y construido localmente. El sistema de orugas final del robot Vali 1.0, se impulsaba con servomotores con reductores sinfin corona, poseía patines doblemente empotrados y uno de ellos a través de canales dispuestos en las placas que lo sostenían, el cual servía de sistema de tensión de la oruga.



Figura 1. Robot Vali.

La oruga adquirida para este robot es discontinua, es decir, su cierre entre los extremos está dado con ganchos metálicos, que se unen con un pasador, tal como una bisagra. La oruga recibe la transmisión de la potencia del motor a través de una catarina dentada. Los dientes de

esta entran en cortes rectangulares presentes en la oruga. Para mantener la oruga dentro del sistema, la misma posee segmentos de canal de perfil rectangular, atornillados en los extremos laterales de la oruga, de forma que la catarina y los patines se mantengan dentro de la zona comprendida entre las dos cadenas de segmentos de canal.

Resultados

- Duración de la oruga: esta oruga muestra fatiga en los extremos de la misma, específicamente en los ganchos metálicos que la cierran. Esta falla se da por la alta tensión requerida de la oruga, por la presión no homogénea de la catarina y por la ausencia de sincronía entre los pasos de la catarina y los cortes dispuestos en la oruga.
- Descarrilamiento: dado que los segmentos discontinuos ubicados en los laterales de la oruga requieren de una buena superficie de contacto, y puesto que la parte frontal del sistema de orugas está guiada solo por patines de un diámetro relativamente pequeño, fue evidente que durante las pruebas en las que el robot giró sobre sus eje y cuyas superficies presentaban un alto coeficiente de fricción, la oruga mostraba un pequeño descarrilamiento, que sumado al posterior avance del robot, terminaba en un descarrilamiento completo del sistema.
- Transmisión de torque: aunque no hubo movimiento relativo de la catarina respecto a la oruga, sí se presentó un problema con este sistema, y fue la falta de sincronía entre los dientes de la catarina y los cortes dispuestos para que los dientes entren en la oruga. Se examinaron las medidas de las catarinas, así como las de las orugas, y los cálculos demostraron que las medidas eran correctas. También se revisó la tensión de las orugas, probando diferentes medidas de tensión, pero en cualquiera de los casos, al encender el sistema, la sincronía se perdía progresivamente. Esto no representó alguna clase de pérdida de movimiento, pero sí afectó el desplazamiento del robot al inducir las vibraciones del impacto de los pasos de la catarina contra el suelo hacia el cuerpo del robot.
- Agarre: esta oruga posee un labrado externo de bajo perfil, que le brinda muy buen agarre en cualquier tipo de superficie, y que es resistente a esfuerzos cortantes, mostrando muy buena adhesión al cuerpo de la banda.

Robot Centinela 1.0

En este robot (Fig. 2) se diseñó y construyó la oruga localmente, con el fin de corregir problemas detectados en la oruga del robot Vali 1.0. Otro de los factores que influye en esta decisión es el motor usado para la tracción, pues se descartó el sistema servomotor con reductor sinfin corona por un motor BLDC de acople directo.

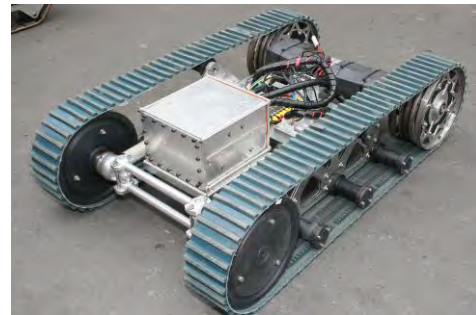


Figura 2. Robot Centinela 1.0

Los principales problemas que se quería resolver con el diseño de la oruga son la discontinuidad y el descarrilamiento. Para este fin, se optó por una oruga continua, cuyos extremos están unidos a través de pegue directo.

Resultados

- Duración de la oruga: la unión directa de fábrica y la ausencia de un sistema de unión metálico le brindaron a la oruga muy buena resistencia a la fatiga, pues no hay elementos ajenos a la misma y que sufran por el movimiento de la misma sobre la catarina y los patines. Sin embargo, el diseño propuesto, basado en la forma de fabricación disponible, mostró que el labrado no posee buena resistencia a los esfuerzos cortantes y, por consiguiente, mostró desprendimiento parcial durante la operación.
- Descarrilamiento: el sistema de tracción de este robot cambió no solo en la oruga a usar, sino en las catarinas, disposición de los patines de apoyo y sistema de tensión. A pesar de que el sistema posee ruedas de gran diámetro en sus extremos, que garantizan un buen contacto con las guías de centrado de la oruga, y que dichas guías poseen perfil trapezoidal y aumentaron en número, el robot bajo condiciones de operación en terrenos de gran agarre, mostró descarrilamiento de las orugas.
- Transmisión de torque: sobre este aspecto hubo incertidumbre en un principio al momento del diseño, pues se tuvieron en cuenta entradas en la oruga para dientes que estarían dispuestos en la catarina. Sin embargo, hubo pérdida de sincronía entre la oruga y la catarina. Por tal motivo, se omitieron los dientes en la catarina y se trabajó la transmisión directa por rozamiento entre la cara interna de la oruga y la cara externa de la catarina. Esta forma de transmisión mostró buenos resultados, pues no se presentó movimiento relativo entre los componentes del sistema.
- Agarre: haciendo a un lado la falta de adhesión del labrado, la oruga mostró buen agarre en toda clase de terrenos.

Robot Vali 2.0

El sistema de tracción de este robot (Fig. 3) es muy similar al del robot Centinela 1.0, habiendo cambiado solo las guías internas de centrado y mejorado la adhesión del labrado externo de la oruga al cuerpo de la misma.

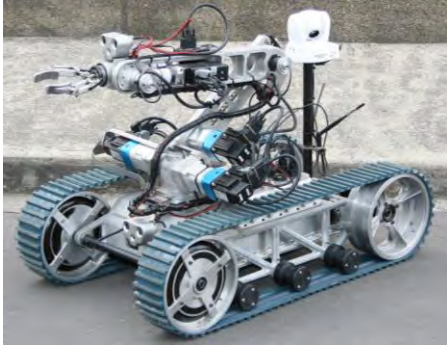


Figura 3. Robot VALI 2.0

Resultados

- Duración de la oruga: presenta buena resistencia en toda la periferia de la banda, pero se mantienen los problemas de adhesión del labrado externo.
- Descarrilamiento: aunque se aumentó la altura del perfil guía y se colocaron perfiles continuos, a diferencia de segmentos de paso recortados de la oruga del robot Centinela 1.0, el descarrilamiento sigue estando presente durante los giros del robot sobre su eje en terrenos de bastante fricción.
- Transmisión del torque: no presenta pérdida de torque entre la catarina y la oruga.
- Agarre: se hicieron pruebas en terrenos no estructurados, incluso se hicieron pruebas de tracción con vehículos en las que el robot mostró buena adhesión a su superficie de contacto.

5. CONCLUSIONES

El uso de una oruga continua brinda gran resistencia a la fatiga, pues no inserta elementos que puedan fallar con el movimiento. Sin embargo, solicitar una oruga de este tipo, y cuyas guías y labrado sean inyectadas directamente sobre la misma, requiere un molde de una complejidad mayor al que se necesitaría si la oruga fuera abierta en sus extremos.

El descarrilamiento sigue siendo el principal problema, pues aunque la falta de adhesión del labrado también afecte el desempeño de la banda, este es gradual y no deshabilita el sistema completamente, como sí lo hace un descarrilamiento. Este aspecto reevalúa todo el diseño de la oruga, pues tal como se está concibiendo el sistema, se requiere de una gran tensión en el mismo para su funcionamiento, pero esta alta tensión puede estar facilitando la adhesión de las guías de centrado sobre las caras laterales de la catarina, de forma que escale y pueda perder su guía. Las opciones para remediar este problema son cambiar el perfil y altura de los canales guía para la

oruga de alta tensión, o evaluar una oruga con mayor rigidez, que no requiera alta tensión y cuyos perfiles guía no tengan la opción de trepar sobre las caras axiales de los patines o ruedas del sistema.

No es necesario el uso de dientes en la catarina y, por consiguiente, de ranuras o elementos dispuestos en la oruga para el engranaje de esta con el elemento transmisor de potencia. Una buena área de contacto y buena tensión en la oruga garantizan la transmisión completa del torque del motor hacia el sistema.

El labrado externo debe ser reforzado o adherido por medios adicionales a la banda, o se debe buscar la forma de inyectarlo o tallarlo directamente sobre la misma, pues el método de pegue vulcanizado muestra pérdida de adhesión con el uso continuo del sistema.

Agradecimientos

El desarrollo de la línea de investigación, así como la producción de los robots Vali 1.0, Centinela 1.0 y Vali 2.0, han sido posibles gracias al apoyo de la Industria Militar, entidad que ha financiado estos proyectos

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Y. Wong, *Theory of ground vehicles*, John Wiley & Sons Inc., 3rd ed, 2001.
- [2] A. Seeni, B. Schäfer, B. Rebele, N. Tolyarenko, *Robot mobility concepts for extraterrestrial surface exploration*, Aerospace Conference, 2008
- [3] P. Fiorini, *Ground Mobility Systems for Planetary Exploration*, In Proceedings of Robotics and Automation Conference, 2000.
- [4] A. Schiele, J. Romstedt, C. Lee, H. Henkel, S. Klinkner, R. Bertrand, R. Rieder, R. Gellert, G. Klingelhöfer, B. Bertrand and H. Michaels, *Nanokhod exploration rover*, IEEE Robotics and Automation Magazine, 2008.
- [5] S. I. Nishida, S. Wakabayashi, *Strategy of JAXA's lunar exploration using a lunar rover*, International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, 2008.
- [6] T. Takayama, S. Hirose, *Development of Souryu-I, connected crawler vehicle for inspection of narrow and winding space*, Proceedings of 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Nagoya, Japan, 2000.
- [7] A. Masayuki, T. Takayama, S. Hirose, *Development of Souryu-III, connected crawler vehicle for inspection of narrow and winding spaces*, Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, 2004.
- [8] <http://www.allenvanguard.com/en-us/products/remotelyoperatedvehiclesrobots/digitalvanguardrov.aspx>

- [9] <http://www.qinetiq.com/what/products/Pages/robotics.aspx?year=2013#prettyPhoto>.
- [10] Thomas Thueer & Roland Siegwart. Evaluation and optimization of rover locomotion performance. ICRA, Rome Workshop on Space Robotics, 2007.
- [11] S.Michaud, L.Richter, T.Thueer, A.Gibbesch, T.Huelsiug, N. Schinitz, S. Weiss, A.Krebs, N.Patel, L.Joudrier, R.Siegwart, B.Schifer, A.Ellery. Rover Chassis Evaluation and Desing Optimisation Using the RCET. Autonomous Systems Lab

CONSTRUCCIÓN DE CELDAS DE CARGA TIPO ANILLO Y ANÁLISIS DE SU COMPORTAMIENTO MECÁNICO

CONSTRUCTION TYPE LOAD CELL RING AND ANALYSIS OF ITS MECHANICAL BEHAVIOR

RESUMEN

Se presenta el análisis de una celda de carga como dispositivo experimental para medición de variables en sistemas de pesaje a bordo.

Palabras clave: Celda de carga, deformación mecánica, esfuerzo mecánico, galga extensiométrica.

ABSTRACT

Se presenta el análisis de una celda de carga como dispositivo experimental para medición de variables en sistemas de pesaje a bordo.

Keywords: Load cell, mechanical deformation, Mechanical stress, strain gauge.

**MELCHOR ANTONIO
GRANADOS SAAVEDRA**

Ingeniero mecánico,
Universidad Nacional,
docente de la Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia
Antoniogs5@gmail.com

**NÉSTOR HERNÁN MATEUS
NIÑO**

Ingeniero electromecánico,
integrante del grupo de
investigación Gente
nanom1104@hotmail.com

1. INTRODUCCIÓN

En la historia de la mecánica, el esfuerzo y la deformación se comprendieron por primera vez en un momento más bien tardío. En 1660, Robert Hooke tuvo algunas nociones respecto a los cuerpos (de acero, hierro y latón) que presentaban deformación elásticas sometidas a una carga. El trabajo de Thomas Young, alrededor de 1807, y su modulo, mejoraron la comprensión de los materiales de tal forma que en 1820 ya se estaban formando las nociones del esfuerzo. Las poderosas concepciones que siguieron nos ayudan en la actualidad. En 1822, Cauchy formalizó la noción del esfuerzo y fundó la base de lo que hoy se llama la **teoría de elasticidad**.

Antes de considerar los detalles de los esfuerzos en un punto y las relaciones entre los componentes del esfuerzo, resulta importante resaltar la relación global entre la carga y las componentes del esfuerzo en un punto. Aquí, la palabra “carga” se emplea en forma genérica y es un sinónimo para la influencia externa como una fuerza, un par de torsión o una tracción cortante.

1.1 Componentes del esfuerzo

En la figura se presenta un elemento general de esfuerzo tridimensional, con tres esfuerzos normales $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ positivos, y seis esfuerzos cortantes $\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}, \tau_{zx}, \tau_{xz}$, también positivos, el elemento está en equilibrio, y por tanto

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz}$$

Los esfuerzos normales dirigidos hacia afuera se llaman **esfuerzos de tensión o de tracción** y se consideran positivos. Los esfuerzos cortantes sobre una cara positiva de un elemento resultan positivos si actúan en la dirección positiva de un eje de referencia. El primer subíndice de una componente del esfuerzo cortante es la coordenada normal a la cara del elemento. La componente del esfuerzo cortante es paralela al eje del segundo subíndice.

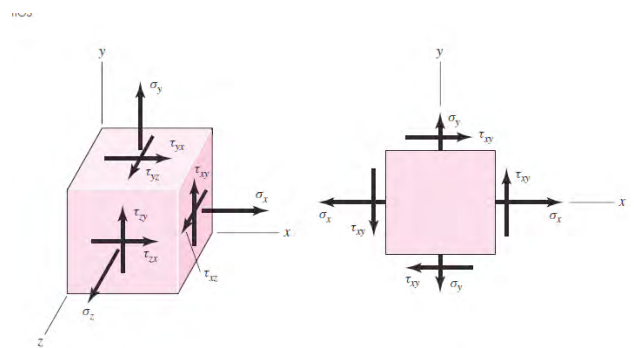


Figura 1. Elemento general del esfuerzo tridimensional

1.2 Deformación elástica

Cuando una barra recta se somete a una carga de tensión, se alegra. La cantidad adicional se llama alargamiento o **elongación**. La elongación por unidad de longitud de la

barra se llama **elongación unitaria** o **deformación unitaria**. La expresión para la deformación corresponde a:

$$\epsilon = \frac{\delta}{L}$$

Ecuación 1: deformación unitaria

Donde δ es la elongación total de la barra dentro de la longitud L .

La elasticidad constituye la propiedad de un material que le permite recuperar su forma y dimensiones originales cuando se elimina la carga.

1.3 Relaciones esfuerzo-deformación

Existen muchas técnicas experimentales que se emplean para medir la deformación. Por lo que, si se conoce a relación entre esfuerzo y la deformación, es posible calcular el estado de esfuerzo en un punto, después de que se haya medido el estado de deformación. Las deformaciones principales se definen como las deformaciones en las direcciones de los esfuerzos principales [1].

La demanda siempre creciente para el mejoramiento en el diseño de maquinaria y estructuras llevó al desarrollo de varias técnicas experimentales para determinar los esfuerzos a los que estos son sometidos.

Los medidores de deformación se pueden clasificar en cuatro clases de acuerdo con su construcción: mecánicos, ópticos, eléctricos y acústicos.

Para el desarrollo del proyecto se seleccionó el medidor de deformación de clase eléctrica llamados galgas extensiométricas de resistencia eléctrica. Esta es la razón por la que es el dispositivo más utilizado para el análisis de esfuerzos o como sensores en transductores diseñados para medir fuerza, par, presión y aceleración.

Las galgas extensiométricas poseen como principio de funcionamiento el efecto piezorresistivo de metales y semiconductores, según el cual, su resistividad varía en función de la deformación a la que están sometidos, el material del que está hecho y el diseño adoptado.

El tipo de medición escogido para la medición de deformación en el cuerpo del eje es llamado medición de fuerza axial y peso. Este es uno de los transductores más utilizados en la industria, su funcionamiento se debe a que se puede relacionar la deformación que sufre la misma con el desplazamiento de un punto específico del elemento.

Para la medición de fuerza se utilizan las celdas de carga o transductores de fuerza las cuales consisten en sensores de fuerza eléctricos, cuya finalidad es relacionar la deformación que sufre la celda de con una señal eléctrica. Estas se basan en galgas extensiométricas que, ubicadas en el transductor en diferentes arreglos, relacionan la

deformación sufrida por la celda de carga con la carga que genera dicha deformación [2].

Una de las aplicaciones de las celdas de carga es la implementación de básculas de camiones en el territorio nacional para saber sobre la carga transportada, las cuales tienen las siguientes características específicas de la balanza:

- Plataforma construida con hormigón armado y cabezales metálicos.
- Se presenta en dos versiones sobre piso con rampas y para instalar en semifoso.
- Celdas de carga en los apoyos para generar señales digitales individuales para una mejor equalización [3].

El desarrollo del proyecto consiste en el diseño y elaboración de una celda de carga tipo anillo para el conocimiento del principio de funcionamiento, diseño y construcción, implementación, adquisición y análisis de datos de la celda de carga tipo anillo para la aplicación de sensores de peso con celdas de carga.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Construcción de la celda de carga

Para la selección de las galgas extensiométricas utilizadas en el proyecto para el prototipo de celda de carga tipo anillo fue el primer paso y el más importante a seguir antes de desarrollar cualquier estudio con galgas extensiométricas, la selección racional de las características de la galga y sus parámetros pueden ser muy importantes en:

- La optimización del rendimiento de la galga para condiciones de operación específicas.
- La adquisición de mediciones más confiables y precisas.
- El montaje de las galgas más simples (minimización del costo total de la instalación).

Los dos parámetros, como lo son conocer con exactitud qué se pretende con las medidas (medidas de deformación, análisis experimental) y las condiciones mecánicas del punto de medida (tipo de esfuerzo, tipos de cargas), definen tres de las características más importantes en la selección de las galgas extensiométricas, las cuales se describen a continuación:

La serie de la galga extensiométrica: aleación con la que está fabricado el elemento sensible de la galga (rejilla).

El modelo de la galga extensiométrica: configuración de la rejilla que tendrá la galga extensiométrica.

Resistencia nominal de la galga: valor de la resistencia de la galga ya que son transductores resistivos [4].

¹ <http://www.autodesk.es/products/inventor/features/all/gallery-view>

El tipo de galga que se seleccionó fue la galga extensiométrica CEA-06-250UW-350 con las siguientes características.

CEA: De todas las aleaciones modernas de *strain gage*, la de constantan es la más antigua, y aún así la más usada. Esta situación refleja que el constantan provee la mejor combinación global de propiedades necesarias para la mayoría de las aplicaciones de los *strain gages*. La aleación constantan es una aleación de cobre y níquel, autocompensado por temperatura.

Galga larga: Cuando se justifica su empleo, las galgas largas ofrecen ciertas ventajas que valen la pena mencionar. Son, casi siempre, más fáciles de manipular en todos los aspectos de la instalación y cableado que las galgas miniatura (3 mm). Más aún, las galgas largas proveen una mejor disipación de calor porque debido a su resistencia nominal tienen menor potencia por unidad de área de grilla. Estas consideraciones pueden ser muy importantes a la hora de trabajar sobre materiales plásticos u otros materiales con pobre disipación de calor. Una inadecuada disipación de calor trae aparejada una sobre elevación de temperatura en la grilla, material de respaldo, adhesivo y superficie de prueba, y puede afectar notablemente el rendimiento y la precisión. La longitud de la galga escogida es de 11.43 mm.

Resistencia de galga: En ciertas instancias, la única diferencia entre dos galgas disponibles de la misma serie, es la resistencia eléctrica (típicamente 120_ contra 350_). Cuando existen estas opciones, la galga con mayor resistencia se prefiere, pues reduce la disipación la generación de calor en un factor de tres (el mismo voltaje se aplica a la galga). La resistencia de galga escogida es de 350 ohmios [5].

Celda de carga tipo anillo

La construcción del anillo se llevó a cabo a través de macizo de acero 1045 de 3 pulgadas de diámetro, se realizó el mecanizado en torno de la pieza para poder lograr la geometría del anillo con espesor de 21 mm, el radio exterior de 76.2 mm y el radio interior de 61 mm, atravesado por un tornillo de diámetro de 9.525 mm y de longitud 119 mm con ajustado y apretado con cuatro tuercas soldadas al tornillo, al tornillo se le hizo una ranura en el centro de 2 mm para la deformación que se presente cuando se realicen las pruebas de compresión como se muestra en la figura.

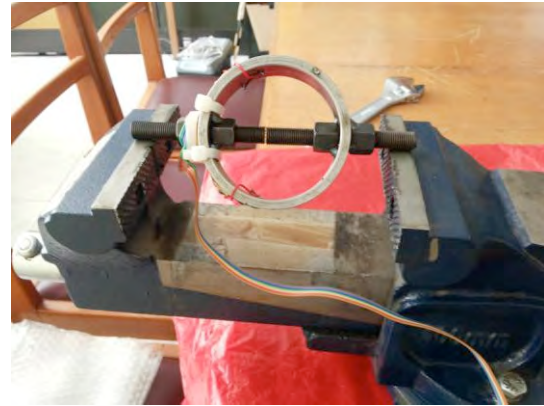


Figura 2. Celda de carga tipo anillo.

2.2 Instalación de las galgas extensiométricas

Para la implantación de las galgas extensiométricas en la celda de carga tipo anillo se utilizaron diversos accesorios y pasos para la instalación de las galgas los cuales son:

Preparación del material: el objeto de crearla preparación del material es crear una superficie limpia de cualquier contaminante, libre de imperfecciones físicas, se lijó bien la superficie donde se iban a pegar las galgas.

Pegado de las galgas extensiométricas: en esta etapa, la galga es adherida a la superficie previamente preparada tan pronto como sea posible para minimizar contaminación, se utilizaron pinzas para impedir el contacto físico con las galgas para asegurar que no se contaminen con la grasa que existiera en el contorno, se utilizó también cinta adhesiva transparente que sirve para ubicar la galga de manera precisa en el material y por último el adhesivo que es un pegamento epóxido especial para el pegado de galgas extensiométricas.



Figura 3. Instalación de las galgas extensiométricas

Soldado de terminales: este paso requiere de mucho cuidado y experiencia ya que debe soldarse el cable a los filamentos de la galga evitando quemarlas, para este soldado de terminales se utilizó un soldador o cautín para unir los filamentos de las galgas con los cables que llevan la señal al puente de *wheatstone*, teniendo como precaución que la punta del cautín sea de terminación

¹ <http://www.autodesk.es/products/inventor/features/all/gallery-view>

plana y no se haga contacto con la terminal de la galga por más de un segundo.

Protección de la galga: es el último paso de la instalación de las galgas extensiométricas, consiste en proteger las galgas extensiométricas ya instaladas y conectadas al sistema de cables de agentes externos como grasas y polvos, para la protección de las galgas se utilizó un barniz de recubrimiento y la aplicación de una capa de silicona para protección mecánica y humedad.



Figura 4. Aplicación de la protección de las galgas extensiométricas

2.3 Adquisición de datos

Para mejorar la señal de medición de las celdas de carga, estas ocupan un arreglo de cuatro galgas extensiométricas o puente de *wheatstone* completo en su interior, lo cual se aplicó para el proyecto.

Para obtener datos realmente fiables de las galgas extensiométricas, se necesita detectar hasta la más mínima variación de voltaje, por lo que se vale de un instrumento eléctrico denominado puente de *wheatstone*, que debido a la disposición de sus resistencia mide variaciones de voltaje mínimas, que generalmente son en milivoltios.

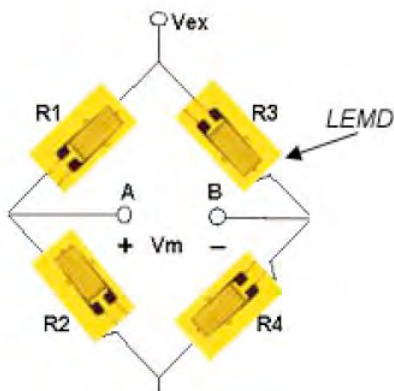


Figura 5. Puente de wheatstone.

La mayoría de los sensores y transductores generan señales que primeramente se deben acondicionar antes de que un dispositivo de visualización muestre los resultados. Este

procesamiento se conoce como acondicionamiento de señal, que incluye funciones como amplificación, filtrado y aislamiento eléctrico.

La etapa de amplificación se debe a que la señal que generan las galgas extensiométricas al medir es muy baja, la amplificación se usa para maximizar la efectividad del equipo; es decir, se mejora la presión y resolución de datos. Para el proyecto se utilizó el amplificador instrumental AD620A con ganancia variable en los pines de entrada 1 y 8 ajustando el valor de la resistencia para obtener diferentes valores de ganancia.

2.4 Herramientas de software

Una vez realizados los procesos anteriores, se procede a visualizar el valor de la medida sea mediante un equipo de visualización o computadora. Para el proyecto se utilizó una pantalla LCD de 16*2 aplicable y programable al microcontrolador Arduino.



Figura 6. Visualización de datos.

Los programas utilizados para la programación de visualización y adquisición de datos para el patronamiento del sensor de carga se utilizó la tarjeta electrónica Arduino UNO, debido al uso fácil y a la simplificación del proceso de programación y al *software* de licencia libre y preparado para ser ampliado por programadores experimentados, controlada por el *software* NI LabVIEW que establece interfaz fácilmente con el microcontrolador Arduino realizando una adquisición de datos visualizado en el computador desde el microcontrolador Arduino.

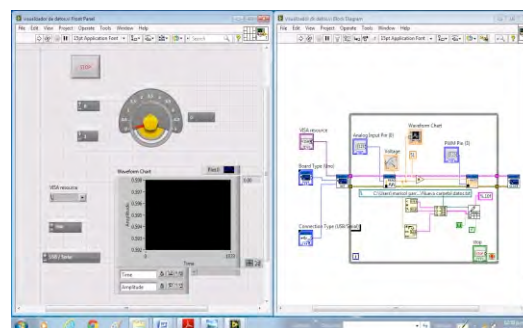


Figura 7. Programación labVIEW.

Se llevaron a cabo los esquemas a escalas reales uno a uno, en el programador llamado Autodesk Inventor Professional 2013 (*software* de diseño mecánico y simulación con características de modelamientos de CAD 3D con características avanzadas de diseño de ingeniería mecánica, análisis de elementos finitos, simulación de movimiento, gestión de datos, sistemas enrutados y diseño de moldes, así como mejoras de productividad de CAD¹).

Se tomó el modelamiento realizado y descrito anteriormente para luego importarlo desde el programa de simulación por elementos finitos de la línea Autodesk, a este modelamiento se le realizaron los pasos de programación para la simulación de deformaciones de la celda de carga tipo anillo.

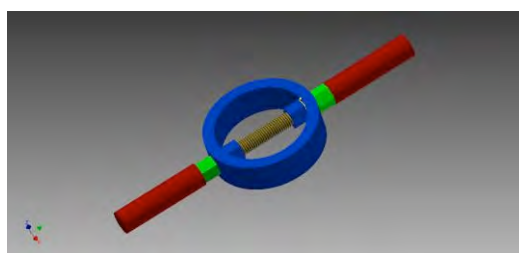


Figura 8. Modelamiento en autodesk Inventor professional 2013.

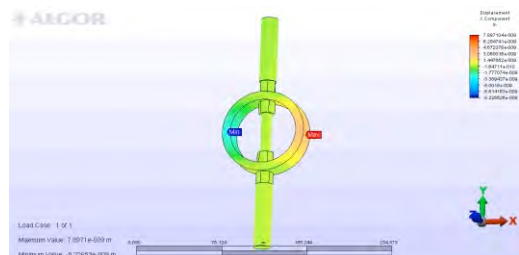


Figura 9. Modelamiento en Autodesk Simulation.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al sensor de carga tipo anillo se le realizaron pruebas de compresión en la máquina universal de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, seccional Duitama, donde se establecía el patronamiento y el ajuste de la ganancia del amplificador instrumental para así obtener la visualización de carga que estaba expuesta la celda de carga tipo anillo.

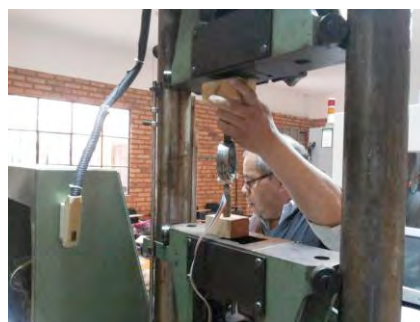


Figura 10. Pruebas de la Celda de Carga tipo anillo.

Los datos de tensión arrojados por la programación de la adquisición de datos contra los datos adquiridos de la fuerza aplicada al sensor de carga tipo anillo se tabularon y se graficaron como se muestra a continuación.

TENSIÓN DE SALIDA(V)	FUERZA (KN)
0.598	0.15
0.615	1.25
1.02	1.37
1.41	2.1
1.54	2.5
1.7	2.55
2.03	3
2.18	3.35
2.31	3.5
2.7	4

Tabla 1: Datos de la prueba en compresión de la celda de carga.

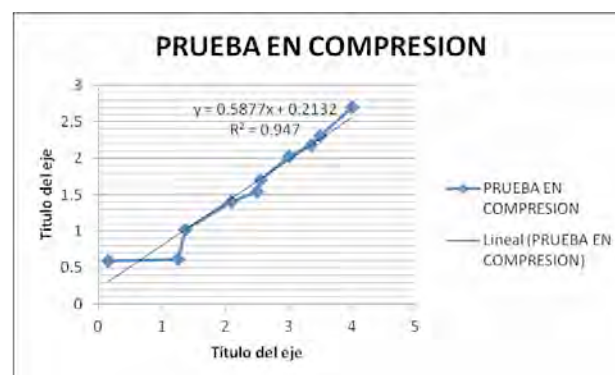


Figura 11: Gráfica de datos de la prueba de compresión

También se adquirieron datos de la prueba del estado de compresión al estado natural, se tabularon y se graficaron como se observa a continuación.

¹ <http://www.autodesk.es/products/inventor/features/all/gallery-view>

TENSIÓN DE SALIDA	FUERZA (KN)
2.7	4
2.42	3.5
2.03	3
1.67	2.5
1.34	2
0.99	1.5
0.65	1
0.598	0.5

Tabla 2: Gráfica de datos de la prueba de compresión al estado natural.



4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se puede concluir que el comportamiento de la celda de carga cuando se somete a compresión y descompresión se comporta de manera lineal sacando las ecuaciones de patrona miento de las celda de carga tipo anillo.

Modelamiento mecánico

Gracias al modela miento mecánico realizado en el actual proyecto se seleccionó la ubicación de las galgas extensiométricas para la medición de deformaciones mecánicas producidas por las diferentes pruebas en la máquina universal de compresión y de tensión.

Aplicaciones de la celda de carga en anillo

Estas celdas de carga tipo anillo pueden medir cargas de tracción y compresión teniendo una gran aplicación en la industria.

La tecnología de sensores de carga, gracias a la gran variedad de tipos de galgas extensiométricas, ofrece una medición de variables en diferentes campos de la industria tan diversos como la aviación, la agricultura, la

automatización, la construcción, la medicina, la robótica y las pruebas de materiales.

5. BIBLIOGRAFÍA

Referencias de libros

- [1] Joseph E. Shigley, Charles R. Mischike, *Diseño en ingeniería mecánica*, sexta edición. Mexico, D. F., 2005, p. 596.

Documentos encontrados en internet

- [2]<http://www.mty.itesm.mx/dia/deptos/im/im533/labmm/PracticasMecanica/Cementacion.pdf>
- [3]<http://www.sipel.com.ar/Producto.es.php?LinealID=1&Producto=4&gclid=CO-1rLGaurYCFQeCnQodpnMAFw>
- [4]<http://dSPACE.ups.edu.ec/bitstream/123456789/4482/1/UPS-CT001920.pdf>
- [5]http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/procesos/apuntes/Strain_Gages_1.pdf

RESULTADOS PRELIMINARES EN LA FABRICACIÓN DE TRANSDUCTORES ULTRASÓNICOS A PARTIR DE PVDF-TrFE PARA APLICACIONES EN AIRE

Preliminary results on fabrication of ultrasonic transducers using PVDF-TrFE for applications in air

RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño y fabricación de un par de transductores ultrasónicos de alta frecuencia acoplados en aire, utilizando como material activo un copolímero piezoeléctrico conocido como PVDF-TrFE. Este es un material muy versátil, fácil de manipular, de excelente respuesta electromecánica, poco sensible a la humedad del ambiente, de bajo consumo de potencia eléctrica y con una baja impedancia acústica. El desempeño de estos transductores fue medido a partir de sus características mecánicas, acústicas y eléctricas. Para esto se evaluó el patrón de velocidades de la superficie radiante, patrón que reflejó un comportamiento tipo pistón, lo cual permite realizar un estudio analítico del campo de presiones. Acústicamente, el conjunto se evaluó operando los transductores en modo transmisión, midiendo principalmente las pérdidas acústicas por inserción. También, se evaluó su comportamiento eléctrico a partir del análisis de su impedancia eléctrica y el consumo de potencia de los transductores. Finalmente, se proponen algunas aplicaciones potenciales para este tipo de transductores.

Palabras clave: consumo de potencia, pérdidas por inserción, PVDF-TrFE, transductor ultrasónico acoplado en aire, vibrometría láser.

ABSTRACT

In this work we present the design and fabrication of a pair of high frequency air-coupled ultrasonic transducers, using a piezoelectric copolymer known as PVDF-TrFE. This is a versatile material, easy to manipulate, with excellent electromechanical response, low moisture sensitivity, low power consumption and low acoustic impedance. The performance of these devices was tested through mechanical, acoustical and electrical experiments. The velocity pattern of the active surface was measured. Since a piston-like mode was observed, it was possible to make an analytical study of the acoustic radiated field. Acoustically, the pair of transducers was operated in transmission mode, and the acoustic insertion loss was estimated. Also, an electrical test was performed estimating the electrical impedance and the power consumption of the transducers. Finally, some potentials applications for these transducers are given.

Keywords: air coupled ultrasonic transducer, insertion loss, laser vibrometry, power consumption, PVDF-TrFE.

1. INTRODUCCIÓN

El surgimiento de nuevos materiales piezoeléctricos que permiten obtener características de baja impedancia y alta respuesta piezoeléctrica ha despertado el interés en la comunidad científica, por las aplicaciones ultrasónicas acopladas en aire.

Existen principalmente dos dificultades asociadas a la propagación de ultrasonido en aire [1]: a) la disminución de la eficiencia del transductor debido a la gran diferencia entre las impedancias acústicas del transductor y del aire; b) La atenuación de la energía ultrasónica en

aire debido a la absorción acústica del medio. La primera limitante se puede superar utilizando capas de adaptación o materiales activos con impedancias acústicas muy cercanas a las del aire; la segunda, utilizando técnicas de apilamiento de capas activas (*stacking*) [2], [3].

Los transductores ultrasónicos acoplados en aire se han utilizado exitosamente en la captura de imágenes acústicas; en la determinación de constantes elásticas en placas delgadas; en el estudio del contenido hídrico en plantas; en el análisis de las propiedades viscoelásticas de aerogeles, papeles y derivados, de ferroelectretos y

CARLOS ALBERTO MEZA VALENCIA

Ingeniero mecánico
Estudiante de Maestría en Ingeniería
Universidad del Valle
carlos.meza@correounivalle.edu.co

DAVID ALEJANDRO COLLAZOS-BURBANO

Ingeniero electrónico
Estudiante de Maestría en Ingeniería
Universidad del Valle
david.collazos@correounivalle.edu.co

JOAO LUIS EALO CUELLO

Ingeniero mecánico, Ph.D.
Profesor asistente
Escuela de Ingeniería mecánica
Universidad del Valle
joao.ealo@correounivalle.edu.co

ASFUR BARANDICA

Ingeniero electrónico, M.Sc.
Profesor asistente
Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Universidad del Valle
asfur.barandica@correounivalle.edu.co

polímeros reforzados por fibra de vidrio, entre otras [1], [3-9].

La construcción de estos dispositivos se ha hecho a partir de diferentes materiales piezoeléctricos, como cerámicas, ferroelectretos, polímeros, entre otros. Estos últimos presentan impedancias acústicas bajas y capacidad de soportar grandes intensidades de campo. Además, presentan ventajas para la construcción de transductores con geometrías complejas, que con otros materiales piezoeléctricos no serían posibles.

En la literatura existe mucho material disponible acerca de la construcción de transductores ultrasónicos a partir de materiales convencionales, como los piezocerámicos; sin embargo, la mayor parte de estos trabajos no es aplicable a los polímeros debido a sus características particulares [10], tales como la baja temperatura de fusión, que en el caso de los polímeros prohíbe el uso de soldadura o de mecanismos tradicionales que impliquen el uso de calor, utilizados para la adhesión de electrodos al material activo. En este documento presentamos una metodología para el diseño, construcción y caracterización de transductores piezoeléctricos de alta frecuencia para aplicaciones acopladas en aire, utilizando un polímero piezoeléctrico de bajo costo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Material activo PVDF-TrFE

Para la construcción del transductor se usó como material activo un copolímero piezoeléctrico conocido como PVDF-TrFE (figura 1), que cuenta con una metalización en aluminio, una frecuencia de resonancia de 2,4 MHz (caras libres, sin restricciones, según fabricante) y un espesor de 500 μm , adquirido en Measurement Specialties Inc. Este es un material flexible al procesamiento, se puede cortar fácilmente y permite construir formas complejas [11-14]. De los polímeros piezoeléctricos, este es uno de los que presenta más alto factor de acople electromecánico [10], [11]; puede trabajar en varios rangos de frecuencias, en un amplio rango dinámico y presenta alta rigidez dieléctrica. Debido a sus características eléctricas, es ideal para aplicaciones portátiles, ya que consume baja potencia en emisión y responde con un alto voltaje en recepción; presenta una baja sensibilidad a la humedad y una relativa baja impedancia acústica (4 MRayls típico), menor que la de materiales típicos como las cerámicas PZT (25 MRayls típico) [10-12].



Figura 1. Material activo PVDF-TrFE con metalización en aluminio.

2.2 Diseño y fabricación de los transductores

El diseño propuesto (figuras 2 y 3) consiste en el acople de piezas de aluminio extruido y material aislante (Empack), y se ha ideado de tal manera que sea de fácil y rápido montaje. El transductor está compuesto por el encapsulado o *housing* (aterrizado eléctricamente) donde están contenidas todas las piezas. Antes de insertar el material activo, se dispone un aislante de pared para evitar el contacto eléctrico entre el material activo y las paredes del encapsulado. La cara superior del piezoeléctrico está en contacto con una pieza de aluminio que hace la función de “retaguardia” o *backing*, la cual se encarga de darle rigidez a la parte trasera del material; adicionalmente, al estar en contacto físico con el material piezoeléctrico, sirve como electrodo de la parte superior del material. Finalmente, para acceder a los electrodos y excitar el transductor se utiliza un conector BNC; el conjunto de piezas se cierra y se sella utilizando tornillos, para garantizar que todas las piezas queden fijas en sus posiciones respectivas.

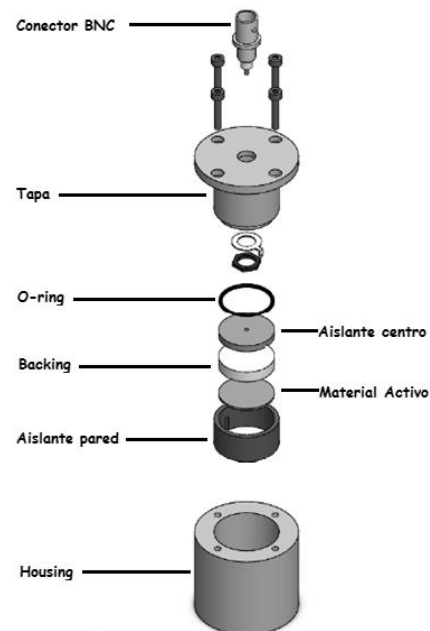


Figura 2. Esquema de construcción del transductor propuesto

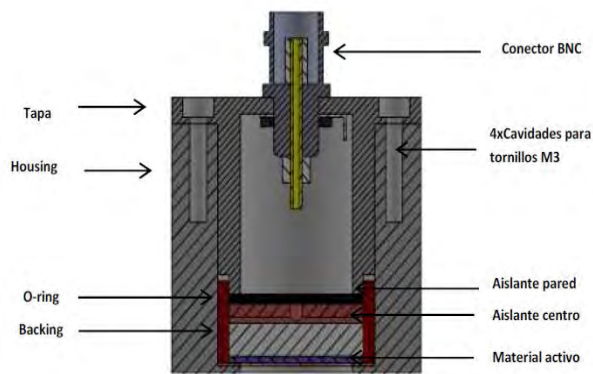


Figura 3. Vista lateral del transductor propuesto.

2.3 Prueba de interferometría

La prueba de interferometría (figura 4) utiliza como elemento principal un vibrómetro láser de efecto Doppler (OFV5000 – OFV 505, Polytec Inc. Alemania), con el cual es posible medir el perfil de velocidades de la superficie radiante del transductor. El barrido sobre la superficie del transductor es realizado utilizando una unidad de desplazamiento XY (Res. 0,04 μm , 300 mm de rango, Newmark Systems Inc., USA). El equipo de excitación del transductor consta de un generador de señales (AFG3022C, Tektronix, USA), con el cual se emite una señal arbitraria con contenido de energía en una banda amplia de frecuencias. Esta señal pasa por un amplificador de voltaje (WMA-300, High Voltage Amplifier, Falco Systems, Netherlands) para poder excitar el elemento activo. La recepción y almacenamiento de los datos se realiza a través de un osciloscopio digital (TDS2014C, Tektronix, USA) conectado a un PC, donde se guardan los datos y se realiza el posprocesamiento.

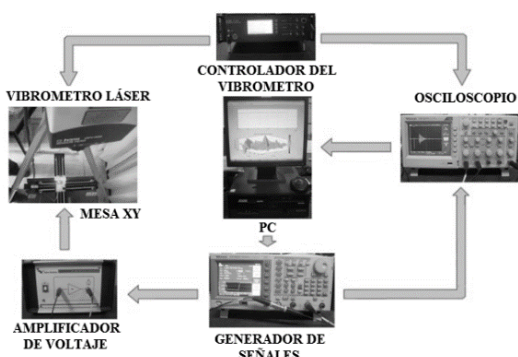


Figura 4. Montaje utilizado en la prueba de interferometría.

2.4 Prueba acústica de pérdidas por inserción

La caracterización acústica es una prueba en transmisión (figura 5) para la determinación de las pérdidas por inserción en una vía. El esquema de excitación es el mismo usado en la prueba de interferometría. Para la recepción, el emisor y el receptor se ubican uno al frente del otro, a una distancia de 30 mm. El receptor se conecta

a un amplificador de señales (5660C, Olympus, USA), el cual amplifica la pequeña señal recibida en el transductor. Las señales emitida y recibida se visualizan en un osciloscopio y posteriormente se digitalizan y envían al PC para su respectivo posprocesamiento.

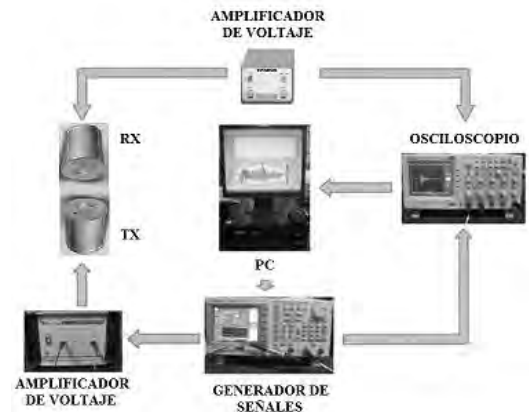


Figura 5. Montaje utilizado para la prueba de caracterización acústica.

3. RESULTADOS

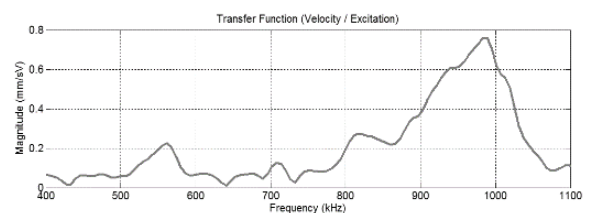
3.1 Transductores construidos

Los transductores construidos (figura 6) se han rotulado como T1 y T2, y cada uno puede operar como emisor/receptor. Físicamente, presentan un área activa circular de 2 cm de diámetro, con dimensiones de housing de 4,45 cm de diámetro y altura de 4,3 cm.

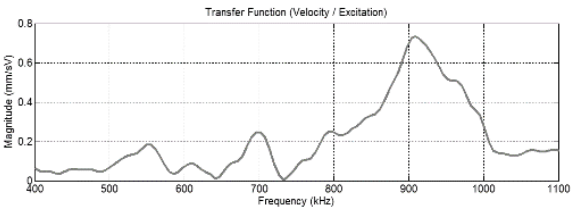


Figura 6. Transductores construidos a partir de PVDF-TrFE.

3.2 Caracterización de los transductores construidos

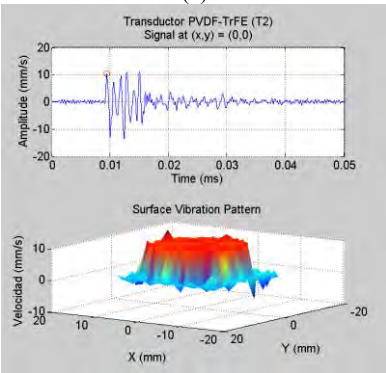
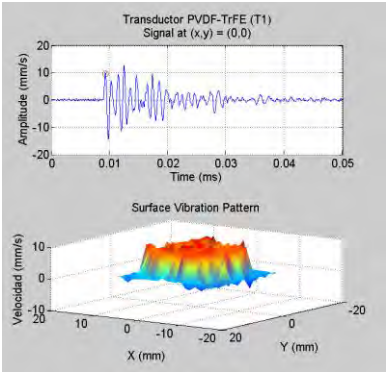


(a)



(b)
Figura 7. Sensibilidad promedio de la superficie radiante del Transductor de PVDF-TrFE. (a) T1; (b) T2.

Utilizando el montaje de interferometría se midió la sensibilidad de cada transductor. La figura 7 muestra que T1 tiene una sensibilidad promedio de 0,7615 mm/s/V y frecuencia de resonancia de 982,7 kHz, ancho de banda (a -6dB) entre 897,2 kHz y 1031 kHz, que corresponde a 133,8 kHz (13,62%). En lo que respecta al transductor T2, se observa que tiene un valor de sensibilidad de 0,7348 mm/sV, a una frecuencia de resonancia de 909,4 kHz, con un ancho de banda (a -6dB) entre 860,6 kHz y 988,8 kHz, esto es, 128,2 kHz (14,10%).



(b)
Figura 8. Patrón de vibración de la superficie activa de los transductores de PVDF-TrFE. Excitación: pulso de banda ancha centrado en 1 MHz. (a) T1; (b) T2.

Un estudio del patrón de velocidades de la superficie radiante (figura 8) muestra que el transductor vibra en forma de pistón (*piston-like mode*), lo cual hace posible un estudio analítico del campo acústico de presiones radiado por el dispositivo. A partir de esta información se estimó que la directividad (distribución angular de la

energía radiada por el transductor) de cada uno de estos dispositivos es de 2° aproximadamente, medida a -6 dB del máximo pico de presión observado. Esto indica que los transductores construidos son muy directivos. Asimismo, un análisis del campo acústico radiado permite determinar que el foco se ubica a 30 cm del transductor. Esto refleja su potencial para aplicaciones en transmisión, sin que requiera mayor cercanía a la pieza de estudio.

La prueba de caracterización acústica se realizó en dos configuraciones: T1 emitiendo - T2 recibiendo; y T2 emitiendo - T1 recibiendo (figura 9). Los resultados (tabla 1) muestran que el sistema de transductores en transmisión presenta la misma frecuencia de resonancia (932,6 kHz), con el mismo factor de pérdida por inserción (-90,3 dB) y ancho de banda ligeramente distinto: el conjunto T2 emitiendo - T1 recibiendo presentó el ancho de banda más alto (14,68 %).

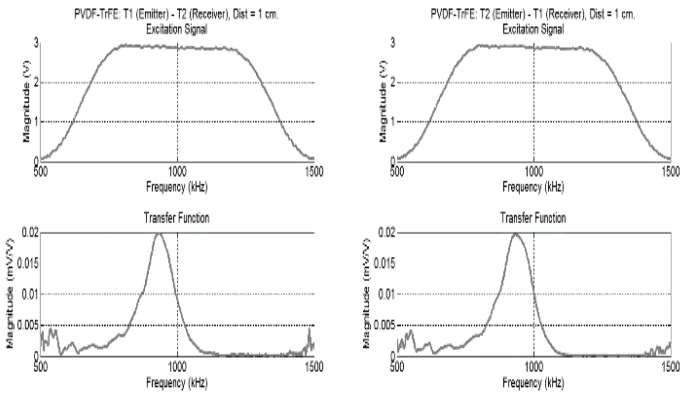


Figura 9. Pérdidas por inserción de los transductores construidos. Arriba: señal de excitación. Abajo: Pérdidas por inserción: derecha: T1; izquierda: T2.

	Configuración del montaje	
	T1 emite - T2 recibe	T2 emite - T1 recibe
Frecuencia de resonancia (kHz)	932,6	932,6
Magnitud en resonancia [mV/V]/(dB)	[0,03]/(-90,3)	[0,03]/(-90,3)
Ancho de banda a -6 dB (kHz) / (%)	896,1 a 1001 / (14,14%)	896,1 a 1006 / (14,68%)

Tabla 1. Pérdidas por inserción en una vía del par de transductores construidos. Distancia = 1 cm.

Por último se realizó una prueba de caracterización eléctrica, en la cual se encontró que el transductor se puede modelar como un sistema eléctrico con una resistencia (133 Ohms) y un condensador (200 pF aprox.) en serie. Aplicando una señal arbitraria con contenido de energía (banda plana) entre 500 kHz y 1300 kHz, a 300 Vpp de amplitud, se midió una potencia consumida de

0,9 mW y una potencia reactiva de -9 mVAr a la frecuencia de resonancia. Esta evaluación refleja el potencial que tiene el transductor para aplicaciones portátiles.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se realizó el diseño, la construcción y caracterización de un par de transductores ultrasónicos, acoplados en aire, fabricados a partir de un copolímero piezoeléctrico de bajo costo (PVDF-TrFE). Los transductores construidos fueron caracterizados mecánica, acústica y eléctricamente, y reflejaron un modo de vibración en forma de pistón, una frecuencia central de operación alrededor de 900 kHz, pérdida por inserción acústica de -90 dB, y un comportamiento predominantemente capacitivo, que se refleja en un bajo consumo de potencia en comparación con su contraparte inductiva.

Este tipo de transductores, en el contexto local, abre una posibilidad al desarrollo, uso y difusión de métodos de ultrasonido acoplado en aire, como la espectroscopia ultrasónica y la tecnología que ella comporta, esto es, el desarrollo de transductores. Asimismo, en biología resulta interesante el uso del ultrasonido acoplado en aire, como método para la determinación del contenido de agua y de propiedades elásticas y composición de tejidos vegetales.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Takahashi, y H. Ohigashi. "Ultrasonic imaging using air-coupled P (VDF-TrFE) transducers at 2 MHz". *Ultrasonics*, Vol. 49, pp. 495-498, 2009.
- [2] T. E. Gómez, y F. Montero, "Materiales y técnicas para el acoplamiento mecánico óptimo de piezocerámicas en aire", *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, Vol. 41, No. 1, pp. 16-21, 2002.
- [3] S. Takahashi. "Properties and characteristics of P (VDF/TrFE) transducers manufactured by a solution casting method for use in the MHz-range ultrasound air". *Ultrasonics*, Vol. 52, p. 52, Issues 442-426, 2012.
- [4] C-H. Chung, Y-Ch. Lee, "Fabrication of poly (vinylidene fluoride-trifluoroethylene) ultrasound focusing transducers and measurements of elastic constants of thin plates". *NDT&E International*, Vol. 43, pp. 96-105, 2010.
- [5] T. E. Gómez, B. González, y F. Montero, "Paper characterization by measurement of thickness and plate resonances using air-coupled ultrasound", *IEEE Ultrasonics Symposium*, 2002.
- [6] D. Sancho, T. E. Gómez, J. J. Peguero, y E. Gil. "Air-coupled broadband ultrasonic spectroscopy as a new non-invasive and non-contact method for the determination of leaf water status", *J. Exp. Bot.*, Vol. 61, Issue 5, pp. 1385-1391, 2010.
- [7] S. Dahmen, H. Ketata, M. H. B. Ghazlen, y B. Hosten, "Elastic constants measurement of anisotropic Olivier wood plates using air-coupled transducers generated Lamb wave and ultrasonic bulk wave", *Ultrasonics*, Vol. 50, Issues 4-5, pp. 502-507, 2010.
- [8] B. Kaj, "Evaluation of sandwich materials using ultrasonic air-coupled scanning technique sandwich structures 7", *Advancing with Sandwich Structures and Materials*, Part 8, pp. 805-813, 2005.
- [9] G. Terán, J. L. Ealo, J. F. Pazos, E. E Franco, y T. Gómez. "Resultados preliminares en la caracterización de papel por espectroscopia ultrasónica". *Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica*. Bucaramanga, Colombia. 2011.
- [10] L. Brown. "Design considerations for piezoelectric polymer ultrasound transducers". *IEEE Trans. on Ultrason. Ferroele. and Freq. Control*, Vol. 47, Issue 6, pp. 1377-1396, 2000.
- [11] *Measurement Specialties, Piezo Film Sensors Technical Sensors*, Sensor Products Division. www.msusa.com
- [12] D. A. Collazos, C. A. Burbano, y J. L. Ealo. "Diseño, construcción y modelado de un transductor ultrasónico en modo longitudinal, a partir de un polímero de bajo costo". *First International Conf. on Advanced Mechatronics, Design, and Manufact. Tec.*, AMDM, Pereira, Colombia, 2012.
- [13] M. Toda, y T. Soitiro, "Theory of curved, clamped, piezoelectric film, air-borne transducer". *IEEE Trans. on Ultrason. Ferroele. and Freq. Control*, Vol. 47, Issue 6, pp. 1421-1431, 2000.
- [14] M. Toda, y J. Dahl, "PVDF corrugated transducer for ultrasonic ranging sensor", *Sensors and Actuators*. Vol. 134, Issue 2, pp. 427-435, 2007.

HERRAMIENTA PARA REALIZAR SOFTWARE-IN-THE-LOOP MEDIANTE ROBOT OPERATING SYSTEM

Tool to Perform Software-In-the-Loop through Robot Operating System

RESUMEN

En este artículo se expone el uso de *Software-in-the-loop* (SIL) y *Robot Operating System* (ROS) como herramientas para la implementación de controladores y simulación de plantas en tiempo discreto. Para la validación experimental se utiliza como planta un levitador magnético, el cual se modela utilizando el formalismo de Lagrange obteniendo un modelo no lineal el cual es tratado mediante el uso del jacobiano para obtener una representación lineal. Este modelo es discretizado mediante una transformación de Tustin para la posterior implementación del lazo de control. Se implementa una retroalimentación de variables de estado como estrategia de control para su validación experimental sobre un sistema (Raspberry-Pi / fit-PC ; Matlab / PC). Se optó por el uso de ROS ya que se encuentra disponible para equipos con sistemas operativos basados en linux, como los utilizados en varios de los sistemas embebidos disponibles en el mercado con el Fit-PC, Beagle-Board y Raspberry-Pi, ROS ocupa poco espacio en disco (instalación básica), se hace la programación en C++ lo que permite un uso más a fondo del *hardware*. Para las pruebas se implementaron tres módulos (nodos); “*reference_node*” el cual se encarga de solicitar al usuario la posición deseada y transmitirla al siguiente nodo, “*control_node*” es el responsable de realizar el control, el cual recibe como entradas la referencia (posición deseada) y la salida de la planta (posición actual), y tiene como salida la señal de control (u), finalmente “*plant_node*” es el nodo que simula el comportamiento de la planta.

Palabras clave: Robot Operating System, Raspberry-Pi, SIL.

ABSTRACT

This article describes the use of Software-in-the-loop (SIL) and Robot Operating System (ROS) as tools for controller implementation and simulation of discrete-time plants is exposed. For the experimental validation is used as a magnetic levitation plant, which is modeled using the Lagrange formalism of obtaining a nonlinear model which is treated by using the Jacobian to obtain a linear representation. This model is discretized using a Tustin transformation for subsequent implementation of the control loop. Feedback state variable is implemented as control strategy for experimental validation on a system (Raspberry-Pi / fit-PC, Matlab / PC). We chose to use ROS as it is available for computers running operating systems based on linux, as used in various embedded systems commercially available com the Fit-PC, Beagle-Board and Raspberry-Pi, ROS occupies low disk space (basic installation), programming is done in C++ allowing more thorough use of the hardware. For testing three modules (node) implemented; "Reference_node" which is responsible for requesting the user to the desired position and transmit it to the next node, "control_node" is responsible for carrying out checks, which receives as inputs the reference (desired position) and the output of the plant (position current), and which outputs the control signal (u), finally "plant_node" is the node that simulates the behavior of the plant.

Keywords: Robot Operating System, Raspberry-Pi, SIL.

CRHISTIAN SEGURA GÓMEZ

Ingeniero Mecatrónico, M. Sc.
Profesor Catedra
Universidad Militar Nueva Granada
crhistian.segura@unimilitar.edu.co

JUAN CAMILO HERNÁNDEZ

Ingeniero Mecatrónico, M. Sc.
Asistente de Investigación
Universidad Militar Nueva Granada
juankmilo8405@gmail.com

ÓSCAR FERNANDO AVILÉS

Ingeniero Electrónico, Ph.D.
Profesor Tiempo Completo
Universidad Militar Nueva Granada
oscar.aviles@unimilitar.edu.co

MAURICIO MAULEDOUX

Ingeniero en Mecatrónica, Ph.D.
Profesor Tiempo Completo
Universidad Militar Nueva Granada
mauricio.mauledoux@unimilitar.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En este artículo se expone el uso de *Software-in-the-loop* (SIL) y *Robot Operating System* (ROS) como herramientas para la implementación de controladores y simulación de plantas en tiempo discreto, SIL ha sido usado para implementación de distintos modelos como se observa en [1,2,3,4]. Para la validación experimental se utiliza como planta un levitador magnético, el cual se modela utilizando el formalismo de Lagrange y obteniendo un modelo no lineal el cual es tratado mediante el uso del jacobiano para obtener una representación lineal [5].

Este modelo es discretizado mediante una transformación de *Tustin* para la posterior implementación del lazo de control. Se implementa una retroalimentación de variables de estado como estrategia de control para su validación experimental sobre un sistema (Raspberry-Pi / fit-PC ; Matlab / PC). Se optó por el uso de ROS ya que se encuentra disponible para equipos con sistemas operativos basados en linux, como los utilizados en varios de los sistemas embebidos disponibles en el mercado como el Fit-PC, Beagle-Board y Raspberry-Pi. ROS ocupa poco espacio en disco (instalación básica), se hace la programación en C++ lo que permite un uso más a fondo del *hardware*, ejemplos de esto se encuentran descritos en [6, 7, 8].

Para las pruebas se implementaron tres módulos (nodos); “*reference_node*” el cual se encarga de solicitar al usuario la posición deseada y transmitirla al siguiente nodo. “*control_node*” es el responsable de realizar el control, el cual recibe como entradas la referencia (posición deseada) y la salida de la planta (posición actual), y tiene como salida la señal de control (u). Finalmente “*plant_node*” es el nodo que simula el comportamiento de la planta.

2. DESARROLLO DEL PROBLEMA

A lo largo de estas secciones se presenta la linealización y discretización de un levitador magnético, junto con la implementación de un controlador de realimentación de variables de estados, todo esto embebido en un sistema embebido, y programado con la herramienta ROS [9, 10].

2.1 Modelado del sistema

A continuación se pretende explicar el procedimiento utilizado para obtener un modelo linealizado digital que sea funcional en un lazo de control en tiempo discreto para realizar la comparación de dos métodos de control como son la realimentación por variables de estado y un

controlador PID. La planta fue utilizada para probar el modelamiento del levitador magnético, ver figura. 1, donde m es la masa de la esfera, g la constante gravitacional, R la resistencia del embobinado y L la inductancia del mismo.

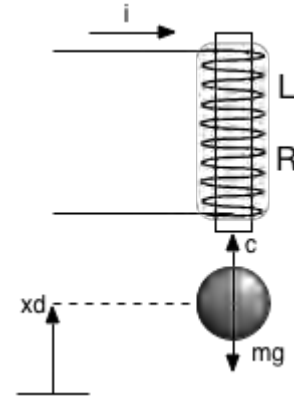


Figura 1. Modelo físico.

Se realizó un modelado matemático del sistema mediante la segunda ley de Newton y la Ley de Kirchhoff, con el fin de obtener las ecuaciones diferenciales, ver ecuación (1) las que permiten representar el comportamiento del sistema.

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 x}{dt^2} &= mg - c \left(\frac{i(t)}{x(t)} \right)^2 \\ L \frac{di(t)}{dt} &= u(t) - Ri(t) \end{aligned} \quad (1)$$

Como se puede evidenciar el modelo matemático es no lineal, con el fin de implementar métodos de control lineales hay que eliminar los componentes de la ecuación que sean no-lineales, ver ecuación. (2). De esta forma es posible implementar estas ecuaciones dentro de un sistema digital para realizar las simulaciones. El término que se agrega al modelo no lineal hace referencia a la posición deseada de la esfera (x_d). Para todo el proceso de simulación los valores utilizados para cada elemento son: masa ($m=0.1\text{Kg}$), gravedad ($g=9.8\text{m/s}^2$), resistencia del embobinado ($R=1\Omega$), inductancia de la bobina ($L=0.01\text{H}$) y fuerza contra electromotriz ($c=1\text{V}$).

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= X_2 \\ \dot{X}_2 &= \frac{g}{x_d} X_1 - 2 \sqrt{\frac{cg}{mx_d}} X_3 \\ \dot{X}_3 &= -\frac{R}{L} X_3 + \frac{1}{L} u \end{aligned} \quad (2)$$

Se cambió la representación a variables de estado para poder realizar los cálculos de forma matricial como se explica en [11, 12], quedando un sistema en espacio de

estados de la forma $\dot{X} = AX + BU$, $Y = CX + DU$ en la ecuación. (3, 4) se encuentra el modelo del levitador en este formalismo. En la figura 2 se encuentra el modelo de la planta en Matlab utilizando las matrices A, B, C, D, como se observa en la figura 3 al aplicar una entrada escalón de 10cm al sistema linealizado.

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{g}{x_d} & 0 & -2\sqrt{\frac{cg}{mx_d}} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} u \quad (3)$$

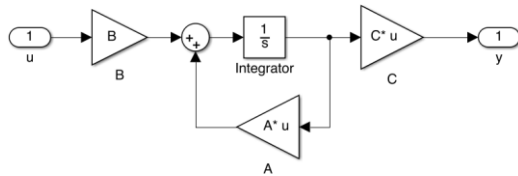


Figura 2. Sistema linealizado.

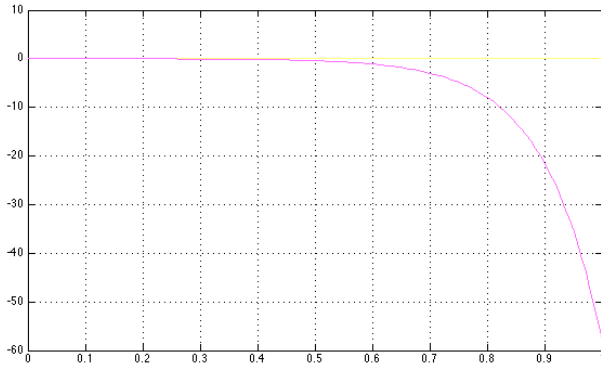


Figura 3. Respuesta frente a entrada escalón 10cm.

Para poder implementar un controlador se deben conocer las características de la planta, como puede ser la ubicación de polos y ceros del sistema, estos se pueden obtener calculando el polinomio característico $\det(SI - A)$ y despejando las raíces, ver ecuación (4). En la figura 4 se encuentra el diagrama de polos y ceros donde se observa un polo ubicado en el semiplano derecho que hace al sistema inestable.

$$pol = s^3 + 100s^2 - 98s - 9800 \quad (4)$$

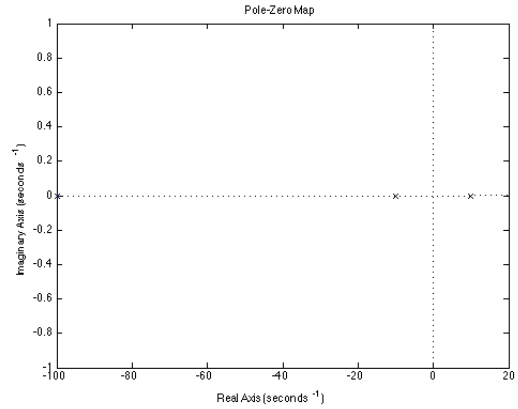


Figura 4. Diagrama de polos y ceros del levitador.

Luego de conocer la cantidad y la posición de polos se procede a verificar que el sistema sea observable y controlable, lo que se realiza mediante el cálculo de los determinantes de las matrices de observabilidad y controlabilidad, ver ecuación (5), de ahí se tiene que ambos son diferentes de cero, con esto es posible implementar un controlador y un observador para obtener la salida deseada.

$$O = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \end{bmatrix}; \det(O) = -6.1358 \times 10^{+05} \quad (5)$$

$$C = [AB \quad A^2B \quad A^3B]; \det(C) = -3.841 \times 10^{+13}$$

2.2 Retro de estado

Para el control por retroalimentación de variables de estado se utilizó el modelo en espacio de estados como se propone en [5], pero debido a que la salida del sistema solo permite medir de manera directa uno de los estados, se planteó el uso de un observador que permitiera obtener los demás estados, para obtener los valores del controlador (K) y del observador (L) que se implementaron, se utilizó el método de Ackerman. Se escogieron como parámetros de diseño un ζ de 0.7 y un t_s de 0.5s, el sistema completo se observa en la figura 5, y las constantes del control en la ecuación (6), en la figura 6 se observa la respuesta del sistema controlado.

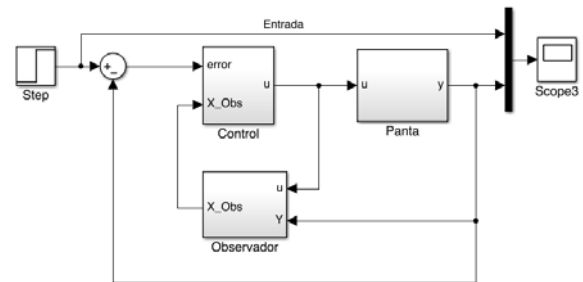


Figura 5. Modelo controlado por una realimentación de variables de estado.

$$K = [-15.3916 \quad -1.0178 \quad 0.4400] \quad (6)$$

$$K_i = -85.4478$$

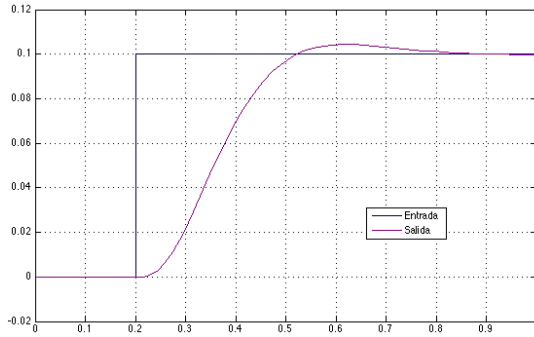


Figura 6. Respuesta del sistema realimentado frente a entrada escalón de 10 cm.

3 ROS

Para la realización de las pruebas del *software in the loop* se implementaron varios nodos, y la información que comparten se llama *topics*, en la figura 7 se encuentra la arquitectura desarrollada en ROS, los nodos son *ref_node* que se encarga de pedir al usuario la referencia deseada y la transmite mediante el *topic* “/ref” al *ctrl_node* que recibe adicionalmente /sal y /obs, internamente realiza el cálculo del error y genera la señal de control a través el *topic* /ctrl. El *planta_node* tiene implementada la ecuación en diferencias que genera la salida del sistema frente a la entrada presentada, pero dado que por la matriz C solo sale un estado, es necesario implementar un observador para estimar los otros dos estados que requiere el método de realimentación por espacio de estados, esto se realiza en *obs_node*.

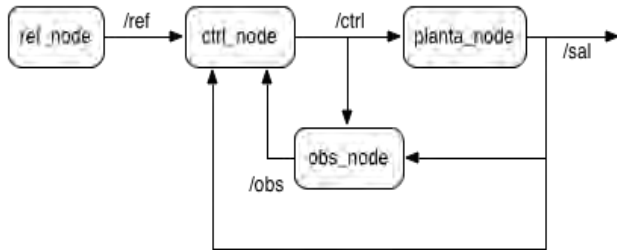


Figura 7. Arquitectura de módulos en ROS.

Las ecuaciones del observador se encuentran en (7) donde A , B y C son las matrices del sistema, K_c es la matriz de ganancias del observador, $\tilde{X}$ y $\hat{y}$ son las variables estimadas y la salida estimada respectivamente.

$$\begin{aligned} \tilde{X}_{(k)} &= B u_{(k-1)} + A \tilde{X}_{(k-1)} + K_c (y_{(k-1)} - \hat{y}_{(k-1)}) \\ \hat{y}_{(k-1)} &= C \tilde{X}_{(k-1)} \end{aligned} \quad (7)$$

En la figura 8 se observa la jerarquía de los programas en ROS, de ahí se puede ver que primero es necesario iniciar el nodo *roscore*, el cual se encarga de coordinarlos a todos y también crea un servidor, esto permite que los demás nodos puedan ser lanzados desde otros

computadores en la misma red, de tal forma que apunten a la IP del equipo que lanzó el *roscore*. Se puede evidenciar que los demás nodos están al mismo nivel jerárquico por lo tanto se pueden iniciar en cualquier orden.

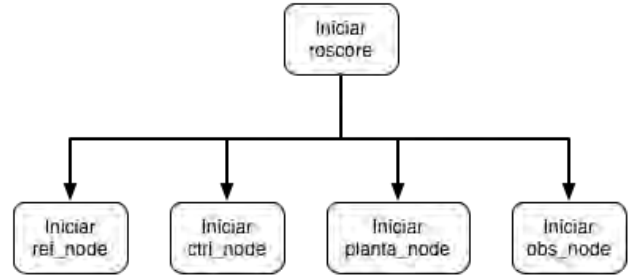


Figura 8. Nodos y su jerarquía en ROS.

En la figuras 9, 10, 11 y 12 se encuentran los diagramas de secuencia de cada uno de los nodos en donde los bloques indican acciones, y las flechas muestran el sentido que sigue el programa. También se evidencia quién publica (emite) los mensajes y cuál nodo es el encargado de recibirlos para poder desarrollar las operaciones pertinentes.



Figura 9. Diagrama de secuencia del nodo referencia.

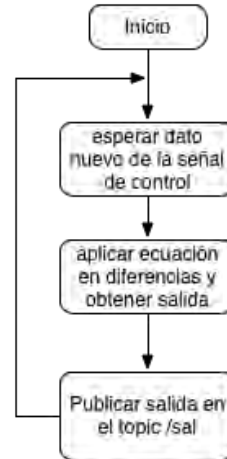


Figura 10. Diagrama de secuencia del nodo planta.

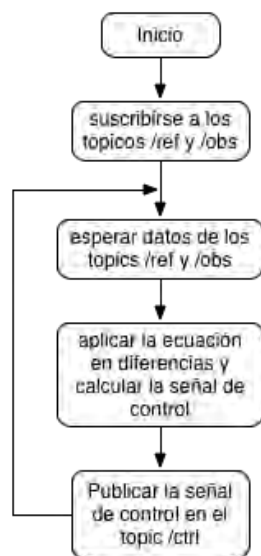


Figura 11 Diagrama de secuencia del nodo de control.



Figura 12. Diagrama de secuencia del nodo del observador.

4. CONCLUSIONES

El uso de ROS como herramienta de simulación de sistemas, mediante la técnica de SIL, permite validar controladores diseñados en discreto dentro de un lazo de control, de este modo se pueden probar las plantas en ambientes de trabajo críticos sin arriesgar maquinaria, equipos o vidas.

El uso de sistemas embebidos, con sistemas operativos que tienen un bajo consumo de recursos, tiene como ventaja que los algoritmos implementados se ejecuten de forma eficiente, para el caso de la herramienta ROS permite que se puedan asegurar tiempos de generación de señales, y de este modo se puede obtener una buena representación en discreto de las señales continuas.

ROS tiene implementada la comunicación entre “Nodos” que facilita la implementación de múltiples programas ya que se pueden usar los protocolos establecidos por defecto o implementar los propios; además, almacena la información transferida permitiendo para el caso de controles y sistemas discretos ver “muestras” o eventos del pasado para la implementación de las ecuaciones en diferencias.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Hubera, C. Bónsa, D. Müllera, *Exergetic evaluation of solar controller using Software-In-The-Loop method*, ScienceDirect ELSEVIER 850-857, 2014 Demers, S.; Gopalakrishnan, P.; Kant, L., "A Generic Solution to Software-in-the-Loop," Military Communications Conference, 2007. MILCOM 2007. IEEE, vol., no., pp.1,6, 29-31 Oct. 2007.
- [2] Hassani, K.; Won-Sook Lee, *A software-in-the-loop simulation of an intelligent microsatellite within a virtual environment*, Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications (CIVEMSA), 2013 IEEE International Conference on, vol., no., pp.31,36, 15-17 July 2013.
- [3] G. Vándia, N. Cavinaa, E. Cortia, G. Mancinia, D. Moroa, F. Pontia, V. Ravagliolia, *Development of a software in the loop environment for automotive powertrain systems*, 789 – 798, 2014.
- [4] Muresan, M.; Pitica, D., *Software in the Loop environment reliability for testing embedded code*, Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 2012 IEEE 18th International Symposium for, vol., no., pp.325,328, 25-28 Oct. 2012.
- [5] F. Grogarda, R. Sepulchreb, G. Bastina, *Global stabilization of feedforward systems with exponentially unstable Jacobian linearization*, 107–115.
- [6] I. Mayachita, R. Widyarini, H. R. Sono, A. R. Ibrahim, W. Adiprawita *Implementation of Entertaining Robot on ROS Framework* ScienceDirect ELSEVIER 380-387, 2011.
- [7] André Araújo, David Portugala,*, Micael S. Couceiroa,b, Jorge Salese y Rui P. Rocha, *Desarrollo de un robot móvil compacto integrado en el middleware ROS*, 315–326, 2014.
- [8] Fetter Lages, Walter; Ioris, Darlan; Santini, Diego Caberlon, *An Architecture for Controlling the Barrett WAM Robot Using ROS and OROCOS*, ISR/Robotik 2014; 41st International Symposium on Robotics; Proceedings of, vol., no., pp.1,8, 2-3 June 2014.
- [9] DeMarco, K.; West, M.E.; Collins, T.R., *An implementation of ROS on the Yellowfin autonomous underwater vehicle (AUV)*, OCEANS 2011, vol., no., pp.1,7, 19-22 Sept. 2011.
- [10] Speers, A; Forooshani, P.M.; Dicke, M.; Jenkin, M., *Lightweight tablet devices for command and control of ROS-enabled robots*, Advanced Robotics (ICAR), 2013 16th International Conference on, vol., no., pp.1,6, 25-29 Nov. 2013.

- [11] K. Ogata, *Ingenieria de Control Moderna*, Prentice Hall; 3rd edition edition (March 1999)
- [12] S. Ramirez *Control de Sistemas No Lineales*, Prentice Hall; (Mayo 2004).

SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE LOS MOVIMIENTOS DE LA MANO A TRAVÉS DE UN GUANTE DE DATOS

Acquisition System Hand Movements through a Data Glove

RESUMEN

Este artículo presenta el diseño e implementación de un guante de datos para la captura de los movimientos de una mano humana, el cual obtiene la información por medio de acelerómetros de los movimientos de flexión y extensión de los dedos, los sensores han sido ubicados en localizaciones específicas para medir las posiciones de cada uno de los dedos. Se presenta el desarrollo de la electrónica y sistema de visualización.

Palabras clave: mano, guante de datos, acelerómetros.

ABSTRACT

This paper presents the design and implementation of a data glove to capture the movements of a human hand, which obtains the information through accelerometers flexion and finger extension, the sensors are located in specific locations for measuring the positions of each of the fingers. The development of electronics and display system is presented.

Keywords: *hand, data glove, accelerometers.*

ÓSCAR F. AVILÉS.

Ingeniero Electrónico, Ph. D.
Universidad Central
oaviless@ucentral.edu.co

LEIDY J. ACUÑA

Ingeniero Electrónico.
Universidad Central
lacunaf@ucentral.edu.co

SEBASTIÁN D. ZAPATA

Ingeniero Electrónico.
Universidad Central
szapatal@ucentral.edu.co

JUAN M. CHAPARRO

Ingeniero Electrónico, M.Sc.
Universidad Central
jchaparrof@ucentral.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Con el paso de los días la ciencia evoluciona a pasos agigantados, pues la demanda tecnológica así lo exige. Para muchos no es difícil notar cómo son más los desarrollos a nivel computacional, cada vez hay ordenadores más pequeños, puertos de alta velocidad, conexiones de Internet de gran complejidad y demás sistemas que pueden en algunos casos dejar sorprendido inclusive al más estudioso en la materia.

Es interesante observar, además de todos estos avances, cómo la ciencia humana intenta conectarse mejor con los ordenadores, hoy existen diseños capaces de crear un pequeño “avatar” a imagen del usuario a través de divertidas interfaces gráficas y, además, este puede interactuar con él, por ejemplo moverse en un mundo virtual para hacer amigos [1][2]; sin embargo, es interesante establecer un vínculo aún más estrecho con estos sistemas, de allí parte la necesidad de la realidad virtual.

Actualmente, la medicina es la rama que mayor demanda presenta hacia este tipo de sistemas, pues la mayoría de procedimientos quirúrgicos requiere de gran precisión. La mano humana, en este caso, a pesar de su complejidad puede en algunos casos no desempeñar de forma adecuada la tarea que se realiza y, por tanto, puede poner en riesgo la vida de un paciente, esto como consecuencia

de una mala manipulación de un instrumento quirúrgico o simplemente por falta de entrenamiento.

Los guantes de datos nacen como estrategia para facilitar las tareas de entrenamiento, estos se han venido desarrollando para diferentes aplicaciones en los campos de entretenimiento e interacción en entornos virtuales, son uno de los medios de comando en la teleoperación háptica [3]. De igual forma, se encuentran aplicaciones para el manejo de robots, como los guantes de datos para manipuladores o manos robóticas [4][5][6]. Uno de los desarrollos más parecidos al realizado en este proyecto se presenta en [7] donde se lleva a cabo la implementación e integración de un guante háptico con una silla de ruedas.

Hoy, a nivel comercial, se encuentran diversos tipos de dispositivos hápticos destinados a diferentes aplicaciones; sean dispositivos muy básicos, como el PHANTOM y el Force dimension [5] o muy completos, como el CyberGlove, que permite ser usado con realimentación vibrotáctil y con realimentación de fuerza [8].

El desarrollo de dispositivos hápticos, tales como los guantes, hace parte de las investigaciones que se están realizando con el fin de poder controlar manipuladores, o cualquier otro dispositivo, sintiendo los movimientos, la fuerza, etc., para poder tener un control más óptimo sobre el sistema [5][6][7]. Por ello, en este trabajo se presenta el desarrollo de un guante háptico capaz de sensibilizar

determinados movimientos de la mano, con el fin de poder controlar el efector final de un manipulador robótico tipo brazo y, de igual forma, tener una realimentación háptica vibrotáctil dependiendo de la fuerza que el efector realice sobre una superficie por medio de los dedos que lo componen.

2. BIOMECÁNICA DE LA MANO

La mano humana abarca desde la muñeca hasta la yema de los dedos en los seres humanos. Son el principal órgano para la manipulación de objetos. La punta de los dedos contiene algunas de las zonas con más terminaciones nerviosas del cuerpo humano y son la principal fuente de información táctil y de fuerza sobre el entorno.

La mano humana se conecta al pulso a través de la palma, y está dotada de veinte grados de libertad, actuados por cerca de cuarenta músculos, [9,10]. La estructura ósea de la mano y los movimientos que pueden ser realizados se presentan en la figura 1, la tabla 1 presenta los límites de estos movimientos en cada una de las articulaciones.

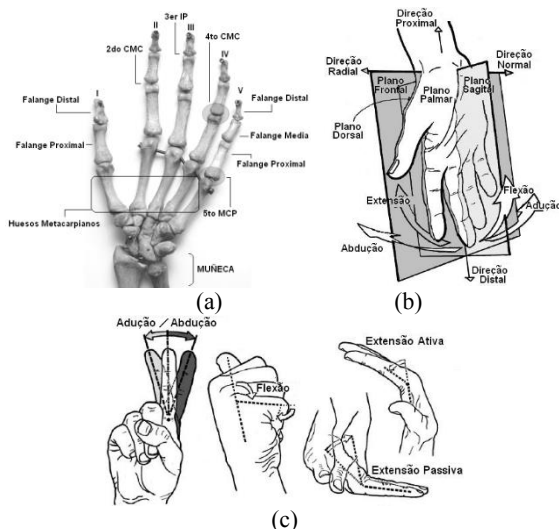


Figura 1. La mano humana: (a) Sistema músculo esquelético; (b) Planos de movimiento, (c) descripción de movimientos.

Como se puede observar en la figura 1, el dedo pulgar está fijado debajo de los otros dedos, pudiendo realizar los movimientos de cierre y rotación, debido a la gran movilidad del hueso metacarpo [10]. Esto permite variar la orientación del plano donde es realizado el movimiento de flexión y extensión, propiedad a través de la cual es posible oponer este dedo a los otros.

El término abducción se entiende como el movimiento de salida del dedo del eje del brazo. El movimiento de extensión/abducción es la capacidad de extensión del pulgar para la parte exterior y flexión hacia el interior de la palma. El término oposición es definido como la

capacidad de unión de las puntas del pulgar y el dedo meñique. La aducción/abducción son la capacidad de aproximación y separación del pulgar de la palma, cuando ambos se encuentran en un mismo plano. La gran cantidad de músculos y articulaciones presentes en la mano permiten una gran variedad de configuraciones de prensión.

Tabla 1: Articulaciones y límites de la mano humana.

Parte	Jointura	GL	Ángulo Flexión - Extensión	Ángulo Abducción Aducción
Dedos	DIP	1	60	----
"	PIP	1	100	----
"	MCP	2	90	60
Pulgar	IP	1	85	----
"	MCP	2	50	30
"	CMC	2	120	45

3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

El diseño se compone de cuatro componentes principales: los sensores, la fuente de alimentación, la unidad de procesamiento y la unidad de transmisión de la señal.

3.1 Sensores

Para la construcción del guante de datos es necesario el uso de cuatro de estos sensores ubicados en cada falange distal del dedo de la mano a analizar (pulgar, índice y medio) y un último sensor ubicado en el revés de la mano (metacarpo) que servirá como referencia de los movimientos de los dedos y, además, podrá realizar algunas tareas de rotación y movimiento de la muñeca si así fuese requerido.

Para la medición de los puntos de interés del guante de datos se utiliza el acelerómetro MMA7361L fabricado por *Freescale Semiconductor*, Figura 2. Este acelerómetro está basado en tecnología MEMS y funciona con una congelación capacitiva en donde un arreglo de placas se ve afectado por la acción de la fuerza de gravedad que influye sobre ellas generando una variación del campo eléctrico entre las mismas y, por consiguiente, un valor eléctrico que puede ser medido como la magnitud de la aceleración sobre ese eje.

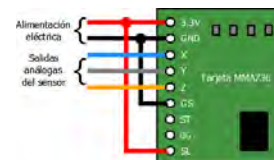


Figura 2. Esquema gráfico de la conexión de pines en la tarjeta MMA7361L.

3.2 Fuente de alimentación

La fuente de alimentación del módulo de captura se diseñó buscando el mejor rendimiento en cuanto a gasto,

disipación de calor y salida de voltaje y corriente. Para ello se plantea un diseño con una fuente conmutada con el fin de eliminar el tema de la temperatura en el integrado que la controla. El circuito integrado usado para la fuente principal es el LM2576 - 5.0

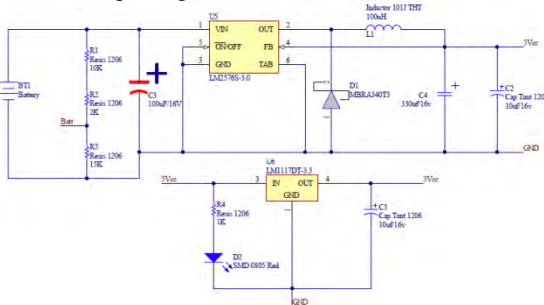


Figura 3. Diseño de la fuente de alimentación para el módulo de captura

3.3 Unidad de procesamiento

Una vez es conectado el guante de datos al dispositivo de captura, es necesario realizar una selección de las señales obtenidas de los acelerómetros y luego acondicionar dicha señal con el fin de enviar estos datos al módulo de procesamiento.

Del guante de datos se obtienen doce señales analógicas en total, tres por cada acelerómetro, para procesar estas se decide entonces multiplexar la señal de forma que se obtengan solo valores en X , Y , Z de un acelerómetro a la vez. Con esto se reduce el número de pines del ADC de doce a solo tres. La multiplexación debe ir cambiando cada vez que se obtenga el muestreo de los valores X , Y , Z actuales con el fin de mantener el flujo de datos y el continuo muestreo de las señales de los cuatro acelerómetros.

Para realizar esta tarea se utiliza el circuito CD4066 que consigue en un arreglo bilateral de cuatro interruptores activados por señales de control independientes.

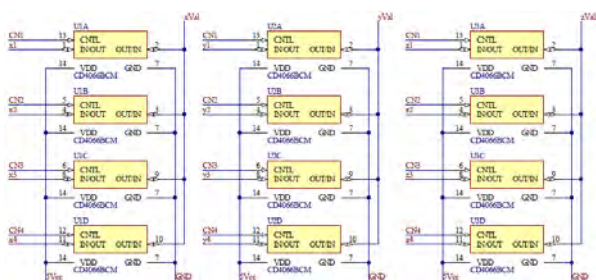
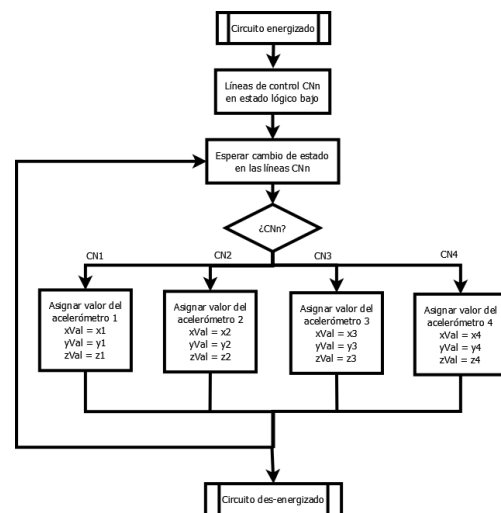


Figura 4. Circuito multiplexor de señales para el guante de datos

Cuando se establece el circuito cerrado para el acelerómetro n , entonces las señales X_n , Y_n , Z_n son convertidas a la señal $xVal$, $yVal$, $zVal$ que llevan consigo la información de ese sensor. Este proceso se repite de manera continua mientras el circuito esté energizado y recibiendo la señal de control CN_n . El algoritmo 1 se

puede apreciar la lógica del funcionamiento del módulo de multiplexación.

Algoritmo 1. Funcionamiento del módulo de multiplexación



La señal $xVal$, $yVal$, $zVal$ se convertirá en $xAcc$, $yAcc$, $zAcc$ una vez atravesase el sistema de seguidores y de esta forma está lista para ser procesada posteriormente.

Procesamiento de la señal

La señal obtenida se procesará usando un microcontrolador de gama media-baja. Este se encarga de realizar la tarea de conversión ADC, controlar las líneas de control CN_n de los multiplexores, organizar los datos en tramas de comunicación y controlar la visualización.

Unidad de transmisión de la señal

La transmisión USB es definitiva para una conexión alámbrica con pocas pérdidas y muy confiables para enviar datos desde el módulo de captura hacia el computador directamente. Para conectar el dispositivo se usa un conector USB Hembra tipo A.

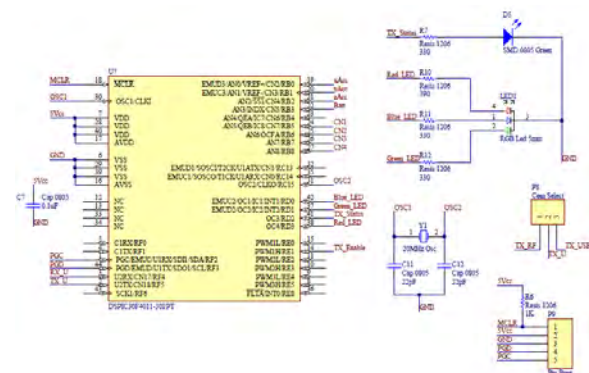


Figura 5. Circuito de procesamiento de la señal para el módulo de captura.

El microcontrolador utilizado es el DSPIC30F4011 que no cuenta con un periférico interno de comunicación

USB y por esta razón se utiliza un *transceiver* del tipo FT232R que tiene la característica de convertir una comunicación serial asincrónica proveniente de la UART en protocolo USB compatible con cualquier PC usando la clase CDC, figura 6.

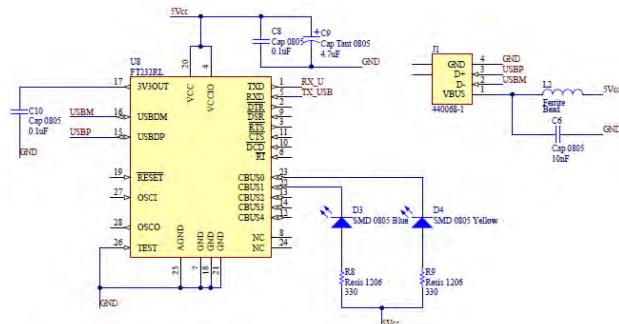


Figura 6. Circuito de procesamiento de la señal para el módulo de captura

Transmisión

Se implementa la transmisión RF con el fin de brindar mayor libertad de movimientos. El dispositivo encargado de la transmisión de datos por medio inalámbrico RF es el TLP434, un dispositivo electrónico que recibe señales por medio de un módulo UART y las transforma en datos de radio frecuencia por medio de modulación ASK a una frecuencia de 433.92MHz. Para ello se hace necesaria una antena capaz de polarizar y transmitir los datos, para ello se usa una antena de codo capaz de irradiar en esta frecuencia. Es elegida la antena ANT-433CW-HWR-SMA, la cual tiene una frecuencia central de 433MHz y un rango de trabajo de 418MHz a 448MHz. La conexión entre el circuito y la antena se realiza mediante un conector SMA fácilmente adquirible y estándar para conexión de este tipo de medios inalámbricos.

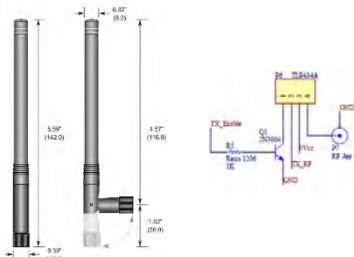


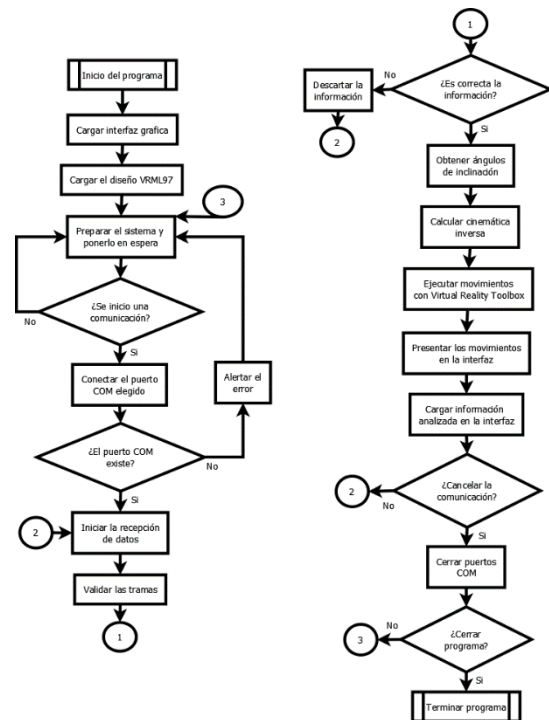
Figura 7. a) Antena RF ANT-433-CW-HWR-XX, b) Circuito de transmisión RF del módulo de captura.

4. SOFTWARE INTERFAZ GRÁFICA

El cerebro de la aplicación de computador está basado en el *software* MATLAB y es el encargado de conectar los componentes de la interfaz gráfica (botones, selectores, etc) con la lógica que se debe ejecutar cuando se manipulen estos y además interactuar con los periféricos del PC para obtener los datos transmitidos desde el módulo de captura (en este caso el puerto serial emulado por la clase USB CDC).

La función principal de esta etapa es obtener los datos vía USB CDC y con ellos realizar el procesamiento de la información para ejecutar los movimientos en una mano virtual. Para ello, es necesario el uso de ecuaciones obtenidas a partir de la cinemática inversa, una técnica que consiste en obtener valores para los ángulos de un sistema con determinados GDL a partir de una posición deseada y conociendo la longitud de sus eslabones. El algoritmo 2 muestra la lógica de empleada en esta tarea.

Algoritmo 2. Algoritmo de funcionamiento de la interfaz gráfica.



Sin embargo, ya que el acelerómetro no es capaz de entregar la posición respecto al desplazamiento, sino respecto a su propio eje, obtener las coordenadas para la posiciones de los mismos se convierte en una tarea compleja ya que se hace necesario plantear un sistema de coordenadas para el guante y uno equivalente en el mundo virtual.

Viendo este problema, entonces se decide implementar un sistema que combina parte de la cinemática inversa y los ángulos de incidencia de la gravedad sobre los acelerómetros. El ángulo de inclinación del acelerómetro permite determina el valor del ángulo de la articulación DIP y a partir de esta, entonces es posible determinar el valor de la cinemática inversa para las articulación MCP y PIP.

La ecuación (1) determina el ángulo de inclinación del acelerómetro sobre un eje con base a la influencia de la

gravedad y características propias de la construcción del acelerómetro[24][8].

$$\theta_{eje} = \sin^{-1} \left[\frac{V_{eje} - V_{0g}}{G \cdot S} \right] \quad (1)$$

Donde θ_{eje} = ángulo de inclinación en el eje consultado, V_{eje} = valor del voltaje entregado por el acelerómetro en el eje consultado, V_{0g} = valor de salida del eje consultado cuando el acelerómetro se somete a una aceleración de $0g$, G = gravedad a la cual es sometido el acelerómetro, para todos los casos $9.8m/s = 1G$, S = sensibilidad del acelerómetro de acuerdo a la aceleración a la que es sometido.

Una vez obtenido este ángulo de inclinación, se procede a ajustar las ecuaciones de cinemática inversa a partir de las ecuaciones (2) y (3) descritas a continuación:

$$Pos_{Xn} = \left(\frac{Fal_n}{2} \right) \cdot \cos[Ajuste - 1.507] + \left(\frac{Fal_{n-1}}{2} \right) \quad (2)$$

$$Pos_{Yn} = \left(\frac{Fal_n}{2} \right) \cdot \cos[Ajuste - 1.507] \quad (3)$$

Donde: Pos_{Xn} = valor de la posición en X y Y para la falange n , Fal_n = longitud de la falange n . $Ajuste$ = valor obtenido para ajustar el ángulo recibido desde el guante de datos a la interfaz de captura en el PC, Fal_{n-1} = longitud de la falange anterior a la actualmente calculada, por ejemplo, si es la falange proximal se debe usar en este valor la medida de la palma de la mano.

La ecuación (4) define el ajuste al algoritmo necesario en la solución de las ecuaciones (2) y (3):

$$Ajuste = (0,5 \cdot Angulo) + 45 \quad (4)$$

Esta ecuación ajusta el ángulo obtenido en la ecuación (1) para implementarlo en la cinemática inversa.

Todos los ángulos manejados en las ecuaciones aquí descritas están dados en radianes. Para lograr realizar la interacción entre el código diseñado en MATLAB y VRML97 se usa la librería de funciones *Virtual Reality Toolbox*.

Interfaz gráfica

La interfaz gráfica es desarrollada usando una GUI de MATLAB, este *toolboox* permite crear rápidamente un entrono gráfico con botones, selectores, entradas de texto y muchos otros más y permite rápidamente asociarlo a funciones y disparadores de eventos cuando se realice la interacción con ellos.

La interfaz gráfica diseñada en este caso se compone de los siguientes elementos:

- Panel de realidad virtual: en este panel se ubica el diseño elaborado en VRML97, este contenedor

cargará el mundo virtual y se podrá interactuar con él usando el mouse.

- Comunicación: aquí se encuentran los componentes necesarios para iniciar la comunicación entre el *software* del PC y los módulos de captura. En el puerto de comunicación se debe seleccionar el puerto COM que asigna Windows al módulo de captura para comunicarse, el método de comunicación determina cuál módulo se usará el alámbrico (módulo de captura) o el inalámbrico (módulo inalámbrico RF).
- Panel de datos recibidos: aquí se muestran los datos recibidos desde el guante de datos, cada acelerómetro tiene su espacio de salida y en él se observan los voltajes arrojados y los ángulos de inclinación calculados.

Para visualizar el diseño de VRML97 se hace uso del visor interno de MATLAB y por esta razón el archivo ejecutable de la interfaz gráfica requiere que se instale el compilador de MATLAB mientras se usa el sistema. No es necesario buscar el compilador en Internet o instalar todo el *software* MATLAB, el archivo ejecutable lo instala y usa automáticamente.



Figura 8. Implementación final.

5. CONCLUSIONES

Aunque los acelerómetros son sensores importantes para determinar la ubicación de un objeto en el espacio, se encontró durante todo el desarrollo del sistema que el sensor usado en este diseño que corresponde al MMA7631L no ofrece una posición en el espacio como coordenadas, sino que, por el contrario, entrega una posición sobre su propio eje con lo que es muy complicado determinar el desplazamiento del mismo de forma confiable, razón por la cual algunos movimientos en los dedos de la mano fueron restringidos.

La latencia observada durante la transmisión de datos vía USB es ocasionada por el tiempo que le toma al microcontrolador realizar el muestreo de las señales de voltaje de los acelerómetros y la posterior conversión de las señales análogas a digitales. Aunque se establecen los tiempos de trabajo aceptables no es prudente aumentar los tiempos de conversión ya que se obtienen resultados no esperados y esto se nota en algunos datos que llegan

de manera errónea y ocasionan que los movimientos no sean exactos.

El sistema de giro de la muñeca se implementa de forma muy sencilla sin adentrar el sistema en muchos detalles sobre el movimiento de la misma. Esta característica es posible gracias al acelerómetro ubicado en el revés de la mano (metacarpo) y su funcionamiento fue basado en la obtención del ángulo de aceleración que incide directamente sobre los ejes del acelerómetro.

Debido a la respuesta del *software*, en especial el diseño de VRML, se forzó a la modificación de las ecuaciones obtenidas desde la cinemática inversa buscando la respuesta adecuada de los movimientos de la mano en el mundo virtual.

El uso de la clase CDC para la comunicación USB permitió que el guante se comunicara de forma más estándar con ordenadores aprovechando su gran facilidad de implementación y adaptabilidad con los sistemas. Esta clase tiene limitantes importantes, por ejemplo, la necesidad de establecer un puerto de comunicación y una velocidad tal cual como lo hace un puerto serial, sin embargo su comunicación se basa en el protocolo USB lo que lo hace robusto ya que todos los equipos de cómputo actuales cuentan con, al menos, un puerto. La libertad de movimiento y la comodidad del usuario es una parte fundamental dentro del diseño del sistema. Para ello, se diseñaron métodos de agarre y ubicación lo más confortables posible, por ejemplo, material de licra para el guante de datos, un sistema de correíllas con velcro para adherir el módulo de captura al antebrazo y el uso de una antena RF con codo para permitir la mayor libertad de movimiento posible durante el funcionamiento de todo el dispositivo.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Haboo Team. *Habbo opens for games developers*. Haboo Team, 2012.
- [2]. Mikael Johnson & Kalle Toiskallio. Fansites as sources for user research: Case habbo hotel. Technical report, Helsinki University of Technology, 2005
- [3]. Jiménez, R., Pineda, C., & Pinzón, J. *Diseño de un guante háptico de control para manipulador robótico teleoperado*. Ingenium, 7(17), pp. 19-28, 2013
- [4]. Ozawa, R. & Ueda, N. *Supervisory control of a multi-fingered robotic hand system with data glove*. En Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on, (pp.1606-1611). Piscataway, NJ: IEEE
- [5]. Ali, A.M.M., Ambar, R., Jamil, M.M.A., Wahi, A.J.M., & Salim, S. *Artificial hand gripper controller via Smart Glove for rehabilitation process*. En Biomedical Engineering (ICoBE), 2012 International Conference on (pp.300304). Piscataway, NJ: IEEE
- [6]. Lee, Y. & Ryu, D. (2008). Wearable haptic glove using micro hydraulic system for control of construction robot system with VR environment. En IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for intelligent Systems [Seoul, Korea. 2008] (pp.638-643). Piscataway, NJ: IEEE.
- [7]. Akmeliawati, R., Tis, F.S.B., & Wani, U.J. (2011). Design and development of a hand-glove controlled wheel chair. En Mechatronics (ICOM), 2011 4th International Conference On [17-19, May 2011. IEEE Kuala Lumpur, Malaysia]. (DOI. 10.1109/ICOM.2011.5937126). Piscataway, NJ: IEEE.

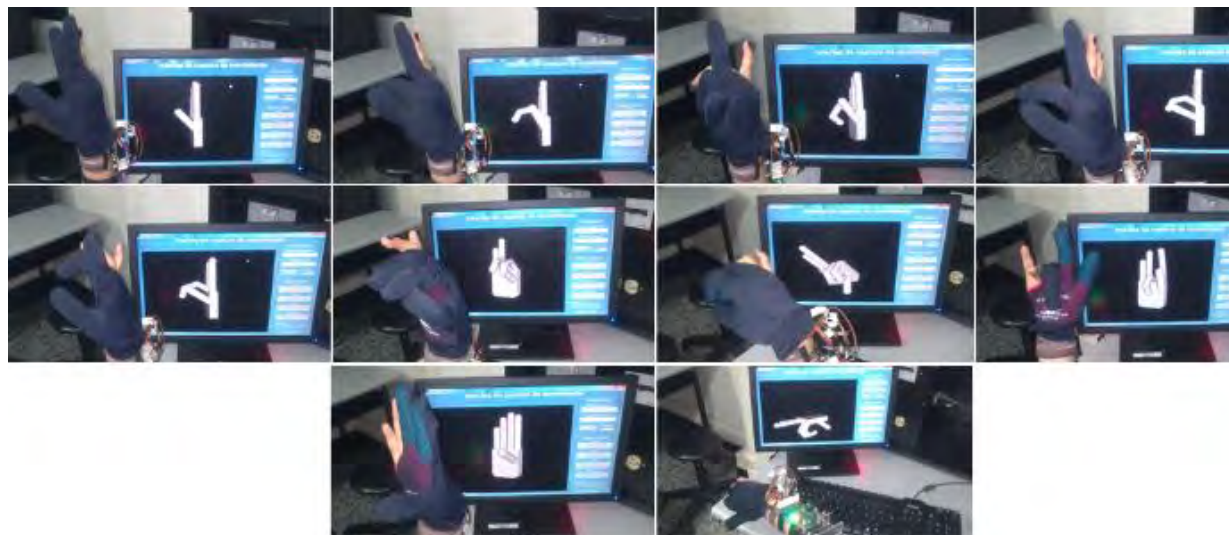


Figura 10. Posiciones logradas con el sistema desarrollado

- [8]. Zhou, J., Malric, F., & Shirmohammadi, S. (2010). A new hand-measurement method to simplify calibration in cyberglove-based virtual rehabilitation, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 59 (10), 2496 - 2504
- [9]. C. M. Light and P. H. Chappell. Development of a lightweight and adaptable multiple-axis hand prosthesis. Medical Engineering & Physics, 22:679–684, 2000.
- [10]. Otto Bock HealthCare GmbH. Disponível em: <http://www.ottobock.com> Duderstadt (DE), 2013.
- [11]. C. S. Lovchik and M. A. Diftler. The robonaut hand: A dexterous robot hand for space. In IEEE International Conference on Robotics & Automation, pages 907–912, Detroit, Michigan, May 10-15 1999.

CARACTERIZACIÓN DE UNIONES ADHESIVAS, UTILIZANDO ADHESIVOS A BASE DE QUITOSÁN, HIDROXIPATITA Y CARBONATO DE CALCIO

Characterization of Adhesive Bonds using Adhesives made from Chitosan, Hydroxyapatite and Calcium

RESUMEN

Las fracturas de secciones trabeculares de hueso resultan en la fragmentación de muchos pedazos. Como solución se ha planteado el uso de adhesivos óseos que generen menor trauma en el paciente. Sin embargo, no existe una metodología estandarizada para la realización de pruebas mecánicas en uniones hueso-adhesivo, por lo que se plantea una metodología replicable con base en estudios previos.

ABSTRACT

Fractures of trabecular bone sections result in fragmentation of many pieces. As a solution, a bone adhesive has been proposed in order to minimize trauma to the patient. However, there is no standardized methodology for conducting mechanical tests on bone-adhesive joints, so a replicable methodology based on previous proposed in this study.

MATEO BONILLA PALACIOS

Estudiante Ing. Mecánica,
Universidad de los Andes
m.bonilla867@uniandes.edu.co

PEDRO FELIPE LONDOÑO DÁVILA

Estudiante Ing. Mecánica,
Universidad de los Andes
pf.londono76@uniandes.edu.co

SAMUEL ALEJANDRO

WOHLSTEIN MOJICA

Estudiante Ing. Mecánica,
Universidad de los Andes
sa.wohlstein2201@uniandes.edu.co

CARLOS ALBERTO PINTO ROMERO

Estudiante Ing. Mecánica,
Universidad de los Andes
ca.pinto1724@uniandes.edu.co

JORGE ALBERTO DE JESÚS

LUQUE MOLANO

Estudiante Ing. Mecánica,
Universidad de los Andes
ja.luque@uniandes.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Las cirugías de reconstrucción de huesos fracturados han presentado enormes avances durante los últimos años. A través de la ingeniería se ha logrado aumentar las posibilidades de recuperar huesos complejos, como los de cadera, los maxilofaciales o los de las articulaciones. Los tornillos, pines y placas han sido algunos de los elementos utilizados durante las últimas décadas en la unión de huesos fracturados como el fémur, la tibia o la clavícula, especialmente en su sección cortical; es decir, su parte alargada [1,2]. Por otro lado, las fracturas presentadas en los cabezales (tejido óseo trabecular), que son las partes en donde los huesos se unen a las articulaciones, son bastante complejas ya que a diferencia de la sección cortical que se rompe de forma transversal, este se fragmenta en muchos pedazos pequeños. De esta manera el uso de placas y tornillos se vuelve inviable [1]. En este orden de ideas se ha planteado el uso de adhesivos como solución al problema que presentan los elementos de restauración ósea tradicionales (tornillos, pines y placas).

Dentro de los objetivos de una rama de la ingeniería se encuentra el desarrollo de adhesivos que permitan reconstruir por completo el hueso fragmentado sin necesidad de implantar un sin número de piezas invasivas (tornillos y placas) en el paciente [3]. Aunque se han producido adhesivos naturales y artificiales diseñados para aplicaciones médicas [4], en la actualidad no existe una metodología estandarizada que permita la caracterización mecánica de adhesivos óseos [5]. En consecuencia, se presenta variabilidad entre los resultados obtenidos por cada estudio que se asocia al procedimiento experimental. Adicionalmente, se encuentran propiedades superficiales como composición química, carga electrostática, textura y porosidad [6], las cuales varían en el hueso con respecto a ciertos parámetros como la edad, el uso y su localización, entre otras [7]. No obstante, investigaciones anteriores han destacado a la porosidad como la propiedad de mayor importancia en las uniones hueso – adhesivo [8], razón por la cual espumas rígidas poliméricas se han

desarrollado como sustituto del hueso en experimentos mecánicos [9, 10].

Conociendo la existencia de pruebas mecánicas previas en los tres principales modos de carga (compresión, tensión y cortante), donde se implementó hueso como sustrato en lugar de espumas [11] y en los que se presentan desviaciones altas de los resultados [12], se propone caracterizar mecánicamente uniones adhesivas a tensión, con diferentes planos de unión con respecto al eje de carga. Con el fin de lograr este objetivo general, se plantearon los siguientes objetivos específicos: proponer un material que posea propiedades similares a las del hueso trabecular, proponer geometrías adecuadas para las probetas del material sustituto, realizar uniones adhesivas con planos de corte a diferentes orientaciones (Traslape, Tope y 45°) y finalmente, caracterizar la respuesta mecánica de la unión frente a la variable de plano de adhesión y tiempo de secado. Los adhesivos utilizados tienen una nomenclatura de la siguiente manera: Q-ABC, donde A es el porcentaje de Quitosán, B el de Carbonato de Calcio y C el de Hidroxiapatita.

2. METODOLOGÍA

La metodología planteada para el desarrollo de este proyecto tuvo como primer paso la selección y adquisición de un material que permitiera replicar las propiedades del hueso en ensayos mecánicos. Posteriormente se realizó el diseño y fabricación de probetas basados en investigaciones previas, junto con el diseño y fabricación de mordazas que posibilitaran un montaje seguro en la máquina Instron 3367. Como paso intermedio se llevó a cabo un ensayo de verificación del correcto diseño de la probeta y de sus propiedades mecánicas. En seguida se elaboró un procedimiento de preparación de la superficie del material que luego permitió la generación de uniones adhesivas libres de contaminación. Finalmente se ejecutaron los ensayos de tracción para comprobar el desempeño mecánico de la unión y el análisis de fractura.

2.1. Selección del material sustituto

La selección del material sustituto se realizó con base en dos criterios: la porosidad y las propiedades mecánicas. Luego de una revisión literaria se encontró que espumas rígidas poliméricas son producidas en la actualidad como reemplazo del hueso en ensayos mecánicos [11], debido a que presentan valores esfuerzos máximos de compresión y tensión similar al del hueso trabecular. El material seleccionado fue la espuma rígida SAN (Estireno-Acrilonitrilo) debido a que sus propiedades mecánicas son cercanos a las de espumas especializadas para reemplazar el hueso. Adicionalmente, el SAN presentaba

una mayor disponibilidad que la ofrecida por otras espumas rígidas.

2.2. Diseño y manufactura de probetas

El diseño de las probetas empleadas en este proyecto se realizó tomando como base una metodología anteriormente implementada en la Universidad de los Andes [13]. La geometría planteada en dicho estudio fue conservada en un alto porcentaje, aunque se modificó la longitud y el concentrador de esfuerzos en el cambio de sección transversal. Con este último se logró un concentrador de esfuerzos de 1.2. La geometría definitiva se muestra a continuación:

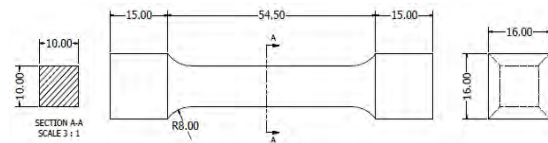


Figura 1. Muestra las dimensiones del diseño final de la probeta (sin cortes).

Debido a la dificultad presentada en el maquinado del material se obtuvieron áreas transversales significativamente variables entre cada probeta. En consecuencia, fue necesaria la medición individual de cada área con un calibrador Vernier. Las geometrías de las probetas se muestran en la figura 2, estas presentan planos de 90° (Tope), 45° (Combinado) y 0° (Traslape) con respecto al eje de carga. El número total de probetas fue de 36, donde se usaron 18 para las uniones con cada adhesivo y de la cuales se destinó 6 para cada tipo de junta.

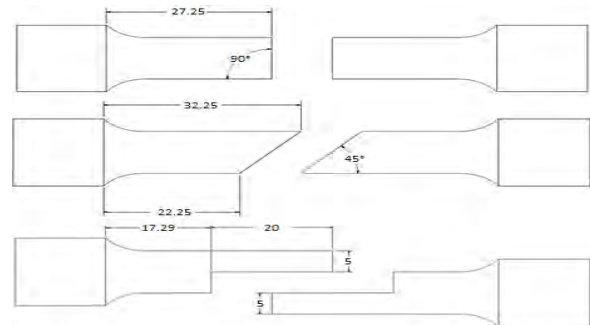


Figura 2. Muestra los cortes realizados sobre las probetas para generar las uniones adhesivas (mm).

2.3. Medición de porosidad en sustratos

La comprobación de la homogeneidad en la porosidad del SAN se llevó a cabo mediante un análisis de imágenes en el programa Matlab, para lo cual se utilizó un código desarrollado por estudiantes de la Universidad de los Andes usado inicialmente para medir el área efectiva del hueso esponjoso bovino [15]. El método consiste en la

segmentación multinivel en capa azul para imagen RGB (formato usado normalmente por cámaras de video y fotos). La imagen es convertida a formato binario (2 colores: blanco y negro) asignando el valor uno (blanco) a los colores que se encuentren por encima del umbral y cero (negro) a los que están por debajo de este. Así, es posible calcular el área efectiva con el porcentaje poros en el área transversal de la probeta. Dicho cálculo se realiza con la siguiente relación:

$$\% \text{ Area no porosa} = \frac{\# \text{ de píxeles donde no hay poros}}{\# \text{ total de píxeles de la imagen}} \cdot 100\%$$

$$\% \text{ Area de poros} = 100\% - \% \text{ Area no porosa}$$

A continuación, se muestra el resultado del tratamiento de imágenes, donde el color negro hace referencia a los poros y el blanco al área no porosa.

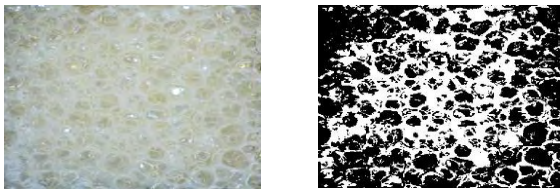


Figura 3. Comparación de porosidad para el método usado

En la figura 3 se observa que el porcentaje de poros no coincide exactamente con la imagen real, lo que se debe zonas que presentan falta de resolución o exceso de sombra o brillo. En consecuencia, se realizó la estimación de la porosidad de manera manual, con el programa Photo Editor Online [16], para 5 imágenes escogidas aleatoriamente, ello con el fin de comparar y calibrar el error del método de Matlab. Este procedimiento hizo que la distinción poro-superficie fuese más confiable, lo cual queda evidenciado en la poca dispersión de los resultados obtenidos. En seguida se presentan los pasos seguidos para estimar la porosidad con el método de Photo Editor Online.

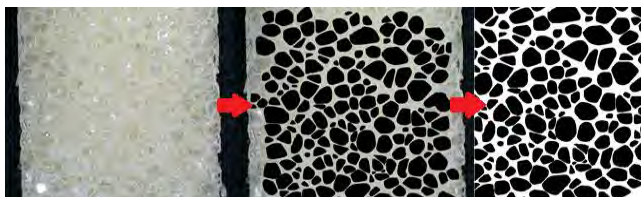


Figura 4. Muestra el proceso de la imagen de la probeta 3 de traslape tratada con Photo Editor Online y analizados en Matlab.

2.4. Preparación de superficies de uniones

El procedimiento de limpieza de las superficies se planteó con base en la norma ASTM D2093-03.: Inicialmente se lijó la superficie de adherencia con una lija lo suficientemente fina como para no desbastar el

Fecha de recepción: 23 de septiembre de 2014

Fecha de aceptación: 1 de octubre de 2014

material. Luego se sopló la probeta con aire comprimido para remover los residuos de la lija y el material. Finalmente se sumergió la probeta en solvente (alcohol etílico) para disolver cualquier residuo o suciedad para luego ser secada y almacenada en una bolsa aislante.

2.5. Generación de uniones adhesivas

La masa de adhesivo aplicada fue de $0.18 \pm 0.003 \text{ g}$ para cada probeta bajo las mismas condiciones de humedad y temperatura. El tiempo de secado fue de 24 horas $\pm 10 \text{ min}$ para cada una. Estas condiciones se cumplen tanto para el adhesivo Q-222 como para el Q-252.

2.6. Ensayos de tracción

Las pruebas de tensión fueron realizadas en la máquina Instron 3367 a una velocidad de deformación de 1mm/min, condición utilizada en [13]. Se probaron 30 probetas en total, 5 por cada tipo de junta.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Esfuerzo último del SAN

Esta prueba permitió confirmar la resistencia a tensión del material y el diseño apropiado del concentrador de esfuerzos. La fractura encontrada se validaba el diseño del concentrador y su esfuerzo máximo de 4.3 MPa superaba al reportado por el fabricante de 3.9 MPa, el cual correspondía al mínimo encontrado en el material y el sugerido para diseño [17].

3.2. Estimación de porosidad

La siguiente tabla presenta los resultados del promedio y desviación estándar para el porcentaje de área porosa obtenida para las probetas de Tope, 45°, Traslape y las 5 probetas modificadas mediante Photo Editor Online. Además se presenta el error relativo.

Probetas	Área de poros (%)	Desviación (+/-)	Error relativo (%)
Tope	67.59	6.76	5.74
45°	62.66	6.31	1.97
Traslape	68.83	5.43	7.68

Tabla 1. Área de poros para los diferentes tipos de probeta.

A partir de los resultados se puede observar que el área porosa estimada mediante el método de Matlab es cercana a 65% del área total, y la desviación en cada tipo de junta no supera el 7%. Por lo tanto se confirma que la porosidad de la espuma SAN se puede suponer homogénea.

Probeta de juntas a Tope	Área porosa	Probeta de juntas a 45°	Área porosa	Probeta de juntas a Traslape	Área porosa
1	N/A	1	67.93	0	62.43
2	59.40	2	60.88	1	71.58
3	N/A	3	65.35	2	63.86
4	69.60	4	61.02	3	65.02
5	61.42	5	60.12	4	66.44
6	67.74	6	60.81	5	68.30
7	70.84	7	65.09	6	62.42
8	64.83	8	65.87	7	69.43
9	64.69	9	60.11	8	68.96
10	64.10	10	59.40	9	71.00

Tabla 2. Porcentaje de área porosa.

3.3. Análisis Anova para esfuerzos máximos de la unión adhesiva

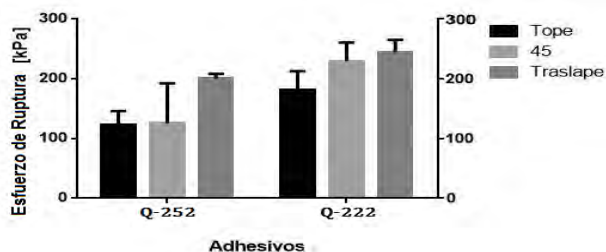


Figura 5. Comparación entre los esfuerzos de ruptura calculados con el área transversal para los adhesivos Q-222 y Q-252 en diferentes juntas.

La figura 5 muestra que los esfuerzos calculados con el área transversal son mayores para la junta de traslape que para las demás. También se observan diferencias significativas entre las juntas de Tope y 45° en el adhesivo Q-252, y diferencia significativa en las juntas de Tope con respecto a las otras dos configuraciones en el adhesivo Q-222. Los resultados exhiben un comportamiento acorde con la teoría de adhesivos ya que el esfuerzo de ruptura aumenta a medida que lo hace la componente cortante de este. Adicionalmente, en la Figura 5 muestra que el adhesivo Q-222 se desempeña mejor que el adhesivo Q-252 en la junta de tope y 45°. Por otro lado, para la junta de traslape no se logró establecer una diferencia significativa entre los adhesivos. Debido a que la espuma SAN es una espuma de celda cerrada, el área efectiva sobre la cual se generan los esfuerzos es diferente al área transversal de la probeta. Por ello se realizó un nuevo cálculo de los esfuerzos teniendo en cuenta el área efectiva de cada una de las probetas (ver figura 6). Esta fue calculada mediante el método de análisis de imagen descrito anteriormente.

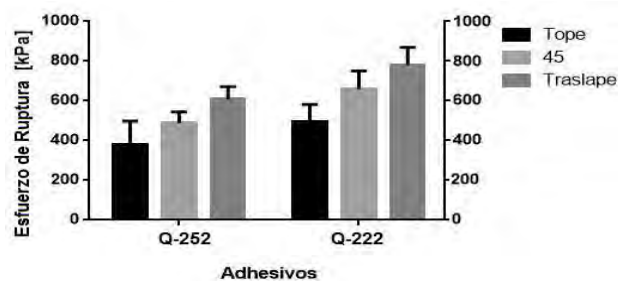


Figura 6. Comparación entre los esfuerzos de ruptura calculados con el área efectiva para los adhesivos Q-222 y Q-252 en diferentes juntas.

Como se puede observar en la figura 6, para los esfuerzos calculados con el área efectiva se encontró que la junta de Traslape tiene un mejor desempeño mecánico que las otras dos juntas. Esta junta muestra diferencias significativas con respecto a las juntas de Tope y 45° en el adhesivo Q-222 y diferencia significativa con respecto a la junta de Tope en el adhesivo Q-252. Este resultado exhibe un comportamiento acorde con la teoría de adhesivos ya que en la junta de traslape el esfuerzo es netamente cortante.

A partir de la Figura 6 también es posible observar que el adhesivo Q-222 mostró un mejor desempeño que el adhesivo Q-252 en la junta de tope y 45°. La junta de traslape no exhibe una diferencia significativa entre los dos adhesivos.

3.4. Análisis de superficies de fractura

Análisis de fractura probetas adheridas con Q-252

Una manera importante de explicar variaciones en los esfuerzos máximos de pruebas de las que se esperarían resultados similares es analizando las superficies de fractura. Para esto, se tomaron imágenes de todos los planos de adhesión posteriores a los ensayos de tracción con un estereoscopio a una magnificación de 40x. El análisis de estas superficies se realizó en torno a los distintos tipos de falla que ocurren en uniones adhesivas, estas son [18]: la falla adhesiva (se separa el adhesivo del sustrato debido a que no existe una buena adherencia entre ambos), la falla cohesiva (el adhesivo se fractura antes de separarse del sustrato debido a una buena adherencia) y la falla del sustrato.

Un ejemplo significativo de una falla adhesiva se muestra en la siguiente Figura, la cual corresponde a las superficies de fractura de una probeta a tope en la cual se utilizó el adhesivo Q252.

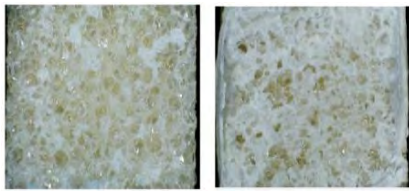


Figura 7. Superficie de falla de la probeta #5 de tope (Adhesivo Q252)

En la anterior figura se observa la presencia en gran cantidad de adhesivo en una cara (derecha) y su ausencia en la otra, indicando que predominó la falla por adhesión. A manera de comparación con el caso anterior, la siguiente Figura muestra un caso en el cual predominó la falla por cohesión.

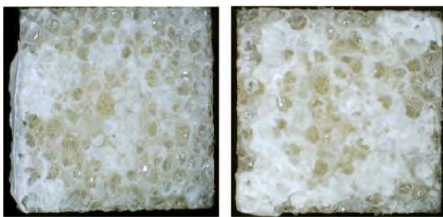


Figura 8. Superficie de falla de la probeta #7 de tope (Adhesivo Q252)

Según los resultados obtenidos, el desempeño mecánico del sistema *substrato-adhesivo* presenta una dependencia significativa del tipo de falla que ocurre. Lo anterior se evidencia en que la probeta #5 obtuvo un esfuerzo máximo de 233,31 kPa mientras que la probeta #7 obtuvo uno de 485,14 kPa, ocurriendo en la última una falla cohesiva. Estas probetas son las mostradas en las anteriores imágenes 5 y 6.

Análisis de fractura probetas adheridas con Q-222

Los resultados obtenidos en las probetas con junta de tope muestran una tendencia de fallas adhesivas, esto se evidencia en la siguiente figura, en donde se observan grandes cantidades de adhesivo en una cara (derecha) y pocas cantidades en la otra. Como se explicó anteriormente, la respuesta mecánica de la unión, dependió significativamente del tipo de falla.

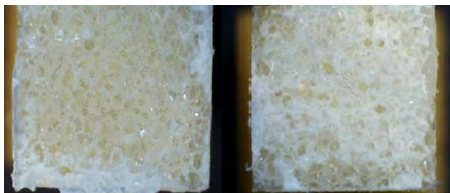


Figura 9. Superficies de falla de la probeta #8 junta de Tope (Q222).

En las juntas de 45° grados en las que se utilizó el adhesivo Q-222 ocurre en menor medida, la falla adhesiva. Sin embargo se observa que las capas restantes en ambas superficies son más gruesas y uniformes, indicando que existieron fallas cohesivas también. A continuación se muestran las superficies.

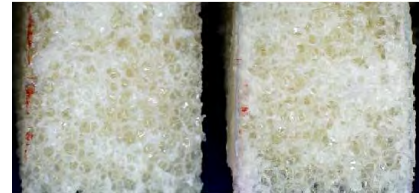


Figura 10. Superficie de falla de la probeta #8 junta 45° (Q222).

En las juntas de Traslape unidas con el adhesivo Q-222 disminuye en gran medida la falla adhesiva. A diferencia de las juntas de 45° y Tope unidas con el mismo adhesivo, en esta junta se observa que ambas superficies permanecen con cantidades similares de adhesivo que se encuentran distribuidas casi uniformemente sobre toda del área de ambas caras, indicando un predominio de la falla cohesiva. A continuación se muestran las superficies.

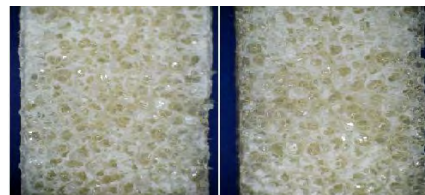


Figura 11. Superficie de falla de la probeta #7 junta Traslape (Q222).

3.5 Influencia del tiempo sobre la unión adhesiva

La comparación del esfuerzo de ruptura contra el tiempo produjo los siguientes resultados:

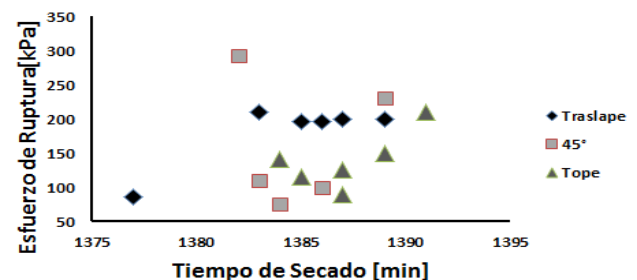


Figura 12. Esfuerzo máximo a tensión contra tiempo de secado para probetas de adhesivo Q252.

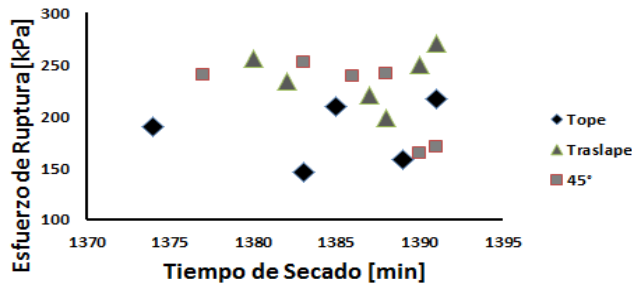


Figura 13. Esfuerzo máximo contra tiempo de secado para probetas de adhesivo Q222.

Las estadísticas de esfuerzo expuestas en las figuras 5 y 6 corresponden a los valores de esfuerzo mostrados en las figuras 12 y 13. Sin embargo, al introducir el eje coordenado del tiempo en las últimas se observa que las desviaciones estándar presentadas en las figuras 5 y 6 no son causadas por un cambio lógico en los esfuerzos de ruptura en el intervalo de tiempo graficado. Por lo que se puede afirmar que después del periodo de secado medio de 23.1 horas no existe dependencia del esfuerzo máximo soportado por la unión en un intervalo de ± 10 minutos.

4. CONCLUSIONES

1. Los resultados muestran un comportamiento de acuerdo al modelo teórico de los adhesivos [19]. La junta de traslape mostro un desempeño significativamente mejor que el de la junta de Tope en las uniones realizadas con ambos adhesivos (Q-252 y Q-222).
2. El aumento en el contenido de carbonato de calcio parece disminuir la resistencia a la ruptura de la unión. El desempeño del adhesivo Q-222 fue significativamente mejor que el del adhesivo Q-252 en dos de los tres tipos de juntas.
3. Es posible garantizar que para un tiempo de secado de alrededor de 23.1 horas, las diferencias de ± 10 minutos entre cada probeta no afectan el esfuerzo de ruptura de la unión adhesiva.

Agradecimientos

Queremos agradecer a principalmente a nuestro profesor asesor: Juan Pablo Casas, por sus contribuciones a lo largo del proyecto. Adicionalmente a los profesores: Francisco Cedano, Diana Tabima y Felipe Salcedo, quienes nos apoyaron durante la realización del mismo. Gracias por su confianza y su guía.

6. REFERENCIAS

- [1] Heiss C, Kraus R, Schluckebier D, et al. Bone Adhesives in Trauma and Orthopaedic Surgery. *European Journal of Trauma* 2006;32:141-8.
- [2] Farrar DF. Bone adhesives for trauma surgery: A review of challenges and developments. *International Journal of adhesion & adhesives* 2011; 33:89-97.
- [3] Kandalam U, Bouvier AJ, Casas SB, Smith RL, Gallego AM, Rothrock JK, Thompson JY, Huang C-YC, Stelnicki EJ. Novel bone Adhesives: a comparison of bond strengths in vitro. *International Journal Oral Maxillofacial Surgery* 2013; 42: 1054-1059.
- [4] Maurer P, Bekes K, Gernhardt CR, Schaller H-G, Schubert J. Tensile bond strength of different adhesive systems between bone and composite compared: an in vitro study. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery* 2004; 32: 85-89.
- [5] Y. Momota, Y. Miyamoto, K. Ishikawa, M. Takechi, T. Yuasa, S. Tatehara, M. Nagayama, K. Suzuki, Evaluation of Feasibility of Hydrxyapatite Putty as a Local Hemostatic Agent for Bone, *Journa of Applied Biomedical Mater Response* 2002; 63: 542-547.
- [6] M.E. Marquis, E. Lordl, E. Bergeronl, O. Drevell, H. Parkl, F. Cabana, H. Sental, F. Fauchaux: Bonecells-Biomaterials interactions. *Frontiers in Bioscience* 2009; 14: 1063-1067.
- [7] Y.N.Yeni: Variability of trabecular microstructure is age, gender, race and anatomic site 2011; 49:886-894.
- [8] V. Karageorgiou, D. Kaplan: Porosity of 3D biomaterial scaffolds and osteogenesis. *Biomaterials* 2005; 26: 5474-5491.
- [9] Hein, T. J.; Hotchkiss, R.; Perissinotto, A.; Chao, E.Y. S. Analysis of bone model material for external fracture fixation experiments. *J. Biomech. Instrum* 1987; 22:43-48.
- [10] J.A. Szivek, M. Thomas, and J.B. Benjamin, Technical Note: Characterization of a Synthetic Foam as a Model for Human Cancellous Bone, *Orthopedic Research Laboratory, Department of Surgery, University of Arizona, Tucson, Arizona* 1993. [12] K.J. Schreader, I. S. Bayer, D.J. Milner, E. Loth, I. Jasuik, A Polyurethane-Based Nanocomposite Biocompatible Bone Adhesive, *Journal of Applied Polymer Science* 2013; 127: 4974-4982.
- [11] K.J. Schreader, I. S. Bayer, D.J. Milner, E. Loth, I. Jasuik, A Polyurethane-Based Nanocomposite

Biocompatible Bone Adhesive, Journal of Applied Polymer Science 2013; 127: 4974–4982.

[12] C. Heiss, N. Schettler, S. Wenisch, S. Cords, F. Schilke, K. S. Lips, V. Alt, R. Schnettler, Bond Strength of an AlkyleneBis(dilactoyl)-Methacrylate Bone Adhesive: a Biomechanical Evaluation in Sheep, Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition 2010.

[13] F. Cedano, J. Casas, D. Tabimas, C. Moreno, J. Briceño. First Approach of a Protocol for Test Bone Adhesives. XV Brazilian congress of biomechanics 2013.

[14] ASTM International. D1623-09: Standard Test Method for Tensile and Tensile Adhesion Properties of Rigid Cellular Plastics.

[15] Cárdenas, Cindy. Pérez, Lizeth. "Cuantificación de área efectiva en corte axial de probetas de hueso esponjoso bovino". Proyecto Curso: Análisis y Procesamiento de Imágenes. Departamento de Ingeniería Biomédica, Universidad de los Andes, Colombia. Diciembre 2013.

[16] Autodesk. (s.f.). Photo Editor Online. Recuperado el 3 de Mayo de 2014, de <http://pixlr.com/>

[17] Data sheet recuperado de <https://es.generalplastics.com/fr-3700.html>

[18] Adhesives and Sealants. Recuperado el 14 de Mayo de 2014 de <http://www.adhesives.org/adhesives-sealants/adhesives-sealants-overview/structural-design/adhesion-cohesion-theory>.

[19] Madrid M. Tecnología de la adhesión. Departamento técnico de Loctite, España. Disponible en: https://www.ulpgc.es/hege/almacen/download/7071/7071377/curso_de_adhesivos.pdf

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE VIDEO ESTEREOSCÓPICO POR MEDIO DE COMPLEMENTOS NVIDIA PARA LABORATORIO REMOTO

Implementation of a stereoscopic video system by NVIDIA® complements for remote laboratory

RESUMEN

En los últimos años, el avance en la creación de aplicaciones para visión en tercera dimensión (3D) ha venido en evolución y crecimiento en diferentes áreas y de este proceso han surgido nuevas herramientas en este campo. Este trabajo presenta los resultados del diseño y desarrollo de un sistema de visión estereoscópica, aplicado en un laboratorio de acceso remoto. Como principal aporte de este trabajo está el realismo en 3D que experimenta el usuario al acceder a la plataforma de entrenamiento, que para este caso hemos representado con un proceso industrial a escala.

Palabras clave: laboratorio remoto (LR), Microsoft Silverlight Web Application (MSWA), NVIDIA, video estereoscópico.

JEFRY MORA

Ingeniero en Mecatrónica
Asistente de Investigación
Universidad Militar Nueva Granada
u1801499@unimilitar.edu.co

DARÍO AMAYA

Ingeniero electrónico, Ph.D.
Docente Tiempo Completo
Universidad Militar Nueva Granada
dario.amaya@unimilitar.edu.co

ABSTRACT

In recent years, progress in creating applications for three-dimension vision (3D) has been evolving and growing in different areas, so new tools have emerged in this field. This paper presents the design and development of a stereoscopic vision system, implemented in a remote access laboratory. The main contribution of this work is the 3D realism that the user experiences when accessing the training platform, represented in this case by an industrial scale process.

Keywords: Microsoft Silverlight Web Application (MSWA), NVIDIA, remote laboratory (LR), stereoscopic video.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los avances tecnológicos han permitido el aumento de recursos para la educación, por ejemplo la implementación de laboratorios remotos (LR), los cuales permiten el acceso a recursos físicos a través de la internet. La implementación de laboratorios remotos implica una alta demanda en la transferencia de datos entre el usuario y el servidor que contiene los aplicativos de acceso a los recursos físicos. En este intercambio de datos, un elemento importante es la transmisión y visualización de video.

Los sistemas de video en 3D han evolucionado en los últimos años y ofrecen cada vez más realismo y confort. Esto ha permitido que sean utilizados en áreas diferentes al cine y los videojuegos, donde tuvieron su primera utilización [1]. De los trabajos que emplean entornos en 3D, se puede destacar el presentado por [2], que desarrolla un entorno 3D bajo el concepto de espacio inteligente (*ISpace*), y cuya función es guiar un robot móvil a diferentes ubicaciones tanto virtuales como reales. En [3] se lleva a cabo la implementación de una aplicación web basada en el control de un laboratorio remoto en 3D bajo NCSLab (Networked Control System Laboratory). Por otro lado, en [4] se desarrolla una

aplicación para la teleenseñanza, con el fin de fomentar el progreso técnico y promover la investigación. En [5] se estudian las ventajas y desventajas de los laboratorios remotos, y se muestra la importancia de estos para la educación virtual. En el trabajo se genera una plataforma más cómoda, con el fin que el usuario puede interactuar sin importar sus limitaciones o capacidades, aprovechando la ventaja de que el entorno 3D produce ambientes más realistas que el 2D y ofrece así una experiencia mucho más vívida al usuario; adicionalmente, estos desarrollos tienen un enfoque mayor en las disciplinas científicas y tecnológicas. Por otro lado, se muestra que los LR implican mayores dificultades que el aprendizaje tradicional, y que estas se centran en los requerimientos técnicos de los sistemas tecnológicos empleados así como en su manipulación, y en general en la plataforma que sirve de interconexión.

Por su parte, en [6] se estudia una filosofía de comunicación de video mediante diferentes protocolos; la arquitectura base es la de que todos los componentes de transmisión deben estar en una nube en internet. En [7] se describe un sistema integrado para la adquisición de datos en tiempo real, *streaming*, y posterior visualización de video 3D en ambientes reales mezclados. En [8] se realiza un estudio sobre diferentes tecnologías de

transmisión de video 3D en dispositivos móviles a través de la tecnología LTE. Los artículos [9], [10], [11], [12], [13] y [14] estudian diferentes técnicas de codificación, buscando la que ofrezca mejor relación entre calidad y velocidad; todos los estudios concluyen generalmente que el códec H.264 ofrece la mejor respuesta.

En este trabajo se desarrolla un sistema de video estereoscópico para un laboratorio ubicado remotamente, utilizando diferentes herramientas, como Microsoft Silverlight Web Application (MSWA) y NVIDIA® Plugin, con el objetivo de emplear un sistema de visión estereoscópico a través de cualquier cámara web, y desde cualquier computador, con lo cual se elimina la necesidad de emplear *hardware* especializado para esta aplicación.

En este artículo, inicialmente se introduce el tema con los diferentes trabajos y aplicaciones desarrolladas; en la segunda sección se muestra la filosofía de comunicación del sistema de visión enfocado a LR; en la parte 3 se muestra el aplicativo realizado; en la 4 se pueden ver los resultados obtenidos; y, finalmente, en la sección 5, se encuentran las conclusiones del trabajo.

2. FILOSOFÍA DE COMUNICACIÓN

Para la implementación de un sistema de visión estereoscópico enfocado a LR por medio de internet, se empleó el esquema de comunicación mostrado en la figura 1 ([15], [6], [8], [16] y [17]). Este esquema propone la instalación de los componentes de comunicación en una máquina virtual. De esta manera, es posible adquirir el video desde cualquier parte de la red y, por medio de diferentes herramientas como NVIDIA® y Microsoft®, se realiza la conversión a 3D del video capturado en 2D [18]. Entre los principales componentes de una transmisión de video en 3D están la adquisición, la compresión, la descompresión y la visualización.

2.1. Compresión

Debido a la necesidad de transmitir el video a través de la web, es necesario realizar con anterioridad una compresión de FR, con lo cual se busca ahorrar ancho de banda, al reducir la cantidad de datos por enviar [15].

Para la compresión de FR, hay diferentes códec, que difieren entre sí en la relación calidad vs. velocidad de transmisión (esta relación es inversamente proporcional). Entre los más comunes está la línea de códec de MPEG, donde se destacan MPEG-1, 2, 7 y 4. El MPEG-4, conocido también como H.264, es el de mejor rendimiento para transmitir video, debido a que incluye normas para sistemas de poco ancho de banda ([15], [10], [14], [19]).

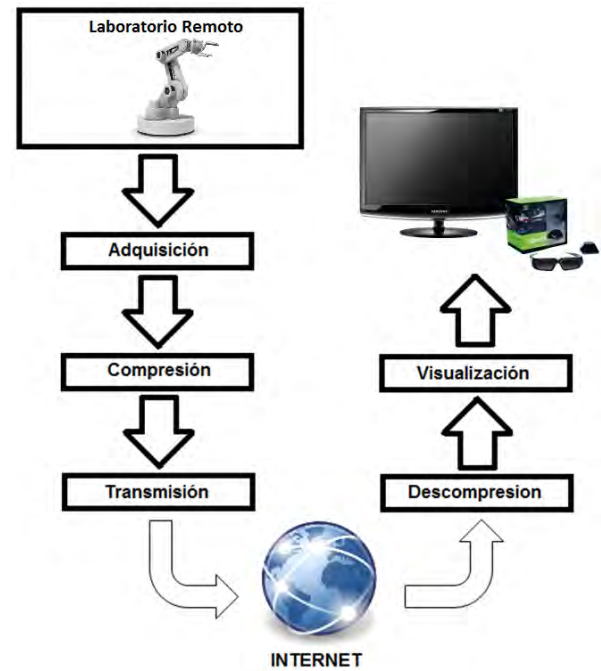


Figura 1. Esquema de transmisión y recepción.

2.2. Transmisión

Para la transmisión existen diferentes protocolos, según el material que se vaya a transmitir. Básicamente existen dos protocolos universales, el TCP/IP y el UDP ([6], [20]). El TCP/IP posee un sistema de verificación de datos, que garantiza que estos no se pierden durante la transmisión, pero que genera retrasos en la comunicación. Por su parte, UDP elimina ese problema ya que no posee verificación de datos, por lo que es más indicado para transmisiones de contenido multimedia; de todas maneras, tanto TCP/IP como UDP garantizan la entrega de solo un video a la vez. ([15], [4], [19]). El protocolo que solucionó ese problema fue el RTP (Real Time Protocol), que surgió con diferentes subprotocolos según sea lo que se transmita, por ejemplo RTCP, RTMP y RTSP ([15], [6]). El RTSP (Real Time Stream Protocol) está específicamente diseñado para transmisiones de audio y video en tiempo real ([15], [4], [19]).

2.3. Descompresión y visualización

Generalmente el método de descompresión va de la mano con el método de visualización, por lo que los medios usados para visualizar son los que se encargan de descomprimir el video. Usualmente se hace por medio de aplicaciones Web, aplicaciones Java, entre otras. A su turno, la visualización se hace mediante monitores, proyectores o televisores ([15], [16], [21], [19], [20]).

2.4. Visión estereoscópica

Para crear el efecto de visión estereoscópica es necesario en todo caso un sistema de visión, ya sea uno de gafas estéreo pasivo o activo, un *head mounted display*, o similares [15].

3. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN

3.1. Adquisición

En este caso, la escena que se pretende transmitir en 3D es una bancada de una línea de producción, compuesta por dos bandas transportadoras, y cuyo objetivo es el ensamble de piezas por medio de rampas, diseñadas especialmente para el acople [22]. La figura 2 muestra una imagen de la bancada desarrollada.



Figura 2. Bancada experimental del laboratorio remoto.

Para adquirir el video del laboratorio remoto se utilizaron dos cámaras Web Genius Facecam 1020. Por medio de la tarjeta de video NVIDIA GeForce GTX 650 del computador, el video es procesado en FR para su posterior uso.

3.2. Compresión

El video se comprimió en H.264, más conocido como MPEG-4, que, como se explicó con anterioridad, es el que mejor comportamiento presenta al transmitir contenido múltiple de video, pues ofrece una calidad de transmisión óptima al tiempo que usa un reducido espacio de ancho de banda ([15], [10], [14], [19]).

3.3. Transmisión

Una vez codificado el video, se transmite usando el protocolo RTSP, el cual forma parte del RTP, el más usado hoy en día. El RTSP se usa para establecer una conexión con el objetivo de controlar el flujo de la información y es comúnmente dirigido a aplicaciones de reproducción de video, donde el control del flujo se hace por medio de instrucciones como: reproducir, pausar,

detener, o grabar estos flujos [15]. La figura 3 explica el funcionamiento del protocolo.

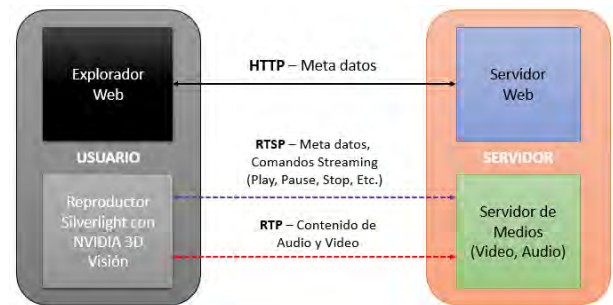


Figura 3. Funcionamiento del protocolo RTSP.

3.4. Descompresión y visualización

Para visualizar el par de videos, se dispuso de una página web creada en MSWA, y diseñada bajo Microsoft Media Plataform (MMP) Player Framework (formalmente conocida como Silverlight Media Framework), que habilita la creación de aplicaciones de video con visión 3D [23].

Para producir el efecto 3D en una aplicación web, se empleó NVIDIA® 3D Vision Plug-in, el cual se ensambló a la aplicación web creada desde MSWP, de manera que formara parte del paquete del reproductor XAP, donde, por medio de la propiedad PlaylistItem, se añade la dirección URI del lugar en el que se han publicado los videos codificados en formato MPEG-4. Las limitaciones del plug-in ofrecido por NVIDIA se reducen a dos: la primera es el escalamiento del tamaño del reproductor, que debe ser previamente configurado en el código HTML del proyecto; la segunda es la relación del aspecto, donde el plug-in por defecto amplía el reproductor en la ventana de la aplicación [23].

Para la programación del aplicativo fueron necesarias diferentes fuentes de programa, que actúan como complementos del principal. Las figuras 4, 5, 6 y 7 muestran los diferentes diagramas de clases que expresan las etapas de funcionamiento del programa principal [24].

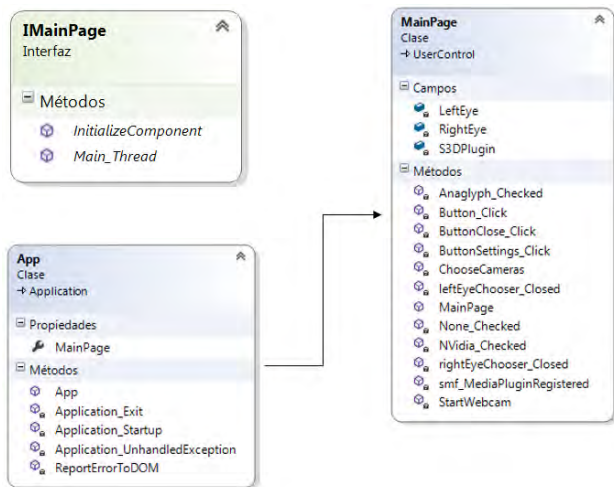


Figura 4. Diagrama de clases del aplicativo.

Inicialmente, la figura 4 muestra el diagrama del programa principal, que se compone de una interfaz gráfica IMainPage, que constituye el sistema de adquisición y reproducción del video en vivo; también se muestra el aplicativo de control general del sistema App, que posee las funciones para la iniciación, ejecución, y control de errores; finalmente se muestra el aplicativo, donde se encuentran los diferentes controles para la visualización 3D. IMainPage tiene tres campos diferentes: dos dedicados a la adquisición del video de las cámaras izquierda y derecha, y uno para diferentes métodos y cuya función principal es manejar tanto los plug-ins de visión estereoscópica y anaglifo, como los controles generales de video.

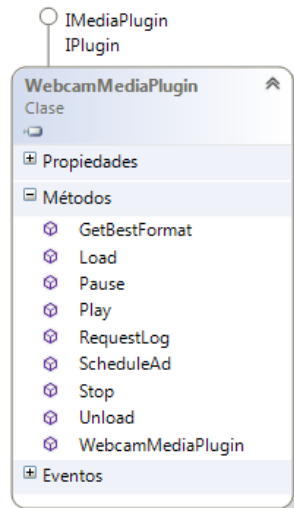


Figura 5. Diagrama de clases del primer complemento.

En la figura 5 se describe el primer programa secundario que actúa como complemento del principal; este programa tiene como función principal la de permitir al programador adquirir imagen y video de una cámara web, por lo que todos sus métodos se centran en la adquisición y control del video de la cámara.

La figura 6 describe el segundo complemento para el aplicativo, con dos funciones. La primera y principal de DualMediaPlugin es el control de dos videos procedentes de dos cámaras web, por lo que para su funcionamiento es necesario el primer complemento. La segunda función, DualAdaptiveMediaPlugin es un complemento de la primera función; en ella se encuentran todos los controles necesarios para la adquisición de video *streaming* por medio de internet; en esta clase se encontrarán los controles de descarga, descompresión y control de video adquirido por medio de la web.

La figura 7 contiene el funcionamiento de los complementos explicados anteriormente como parte de la interfaz principal IMainPage, donde, por medio de los controles programados en las clases anteriores, se maneja toda la interfaz para que sea posible la adquisición y posterior visualización 3D del video adquirido del LR.

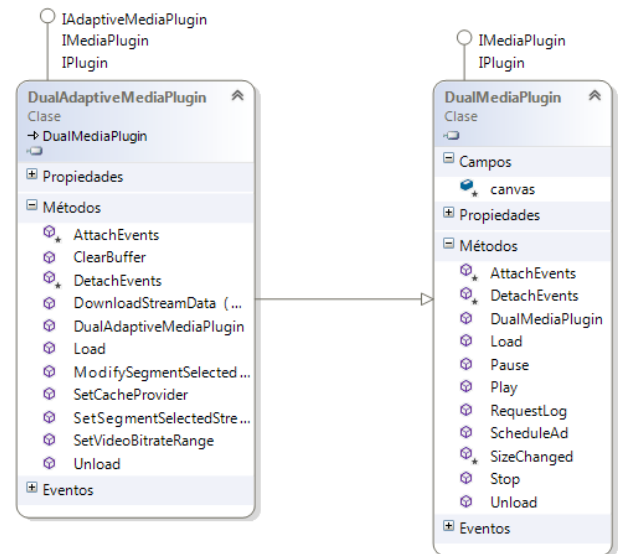


Figura 6. Diagrama de clases del segundo y tercer complemento.

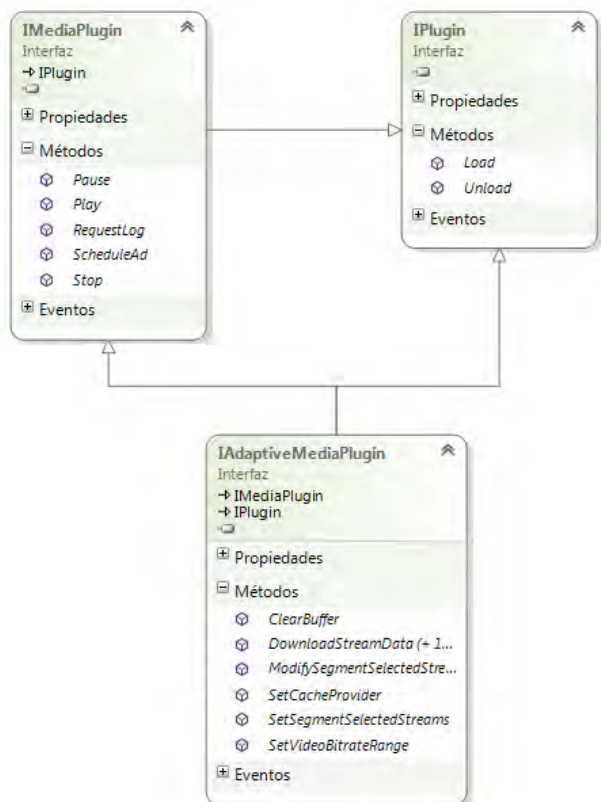


Figura 7. Diagrama de clases de los complementos de la interfaz gráfica.

3.5. Visión estereoscópica

Una vez se obtiene el video por medio del menú creado en la aplicación, se activa la opción 3D que se desee, entre “Anaglifo”, “Visión Estereoscópica” o “Video Estereoscópico 3D”. La diferencia entre las últimas dos radica en que, en la primera, cada imagen ocupa la mitad del reproductor de video, mientras que en la segunda, al igual que en el anaglifo, se ofrece un video estereoscópico con las dos imágenes montadas, lo cual elimina la necesidad de usar monitores 3D, proyectores 3D o similares.

Con el fin de producir el efecto 3D del LR en el usuario, se emplearon unas gafas 3D activas NVIDIA 3D Vision 2.

4. RESULTADOS

El aplicativo web desarrollado en MSWA y con colaboración de los *plugin* NVIDIA 3D Vision y MMP, tiene diferentes opciones de visión 3D; por su parte, el 3D Visión Estereoscópica necesita una tarjeta de video NVIDIA para que pueda funcionar; el aplicativo ofrece visión estereoscópica y anaglifo. La figura 3 muestra las diferentes opciones.

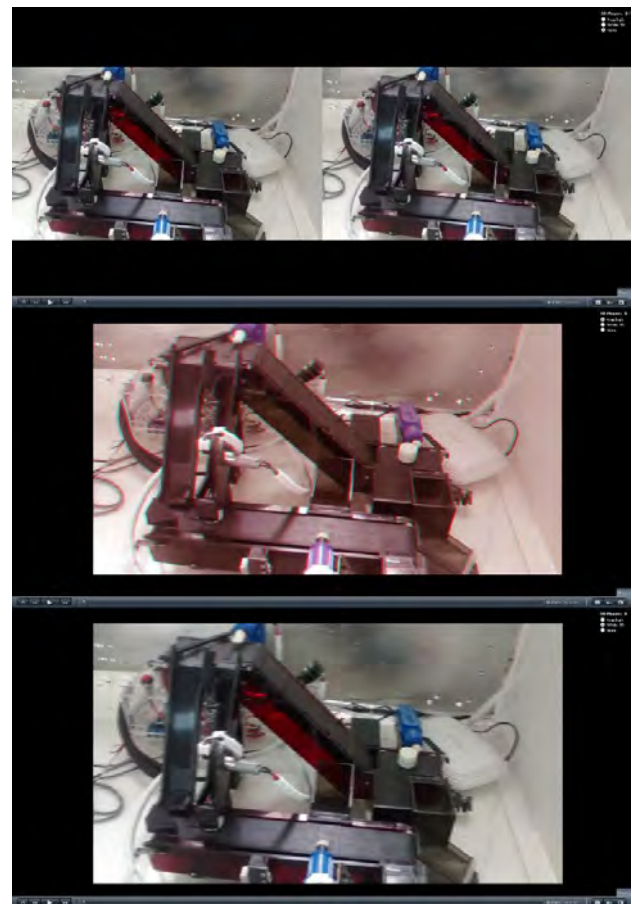


Figura 8. Opciones de visualización 3D en aplicativo web.

Adicionalmente, este aplicativo web cuenta con diferentes herramientas para el control y manipulación del video, al utilizar como protocolo de transmisión el RTSP, que, además, ofrece mecanismos para la supervisión de la transmisión de datos por parte del LR.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El trabajo realizado permitió obtener un aplicativo que transmite el video de un LR en 2D por medio de la web, y lo reproduce en diferentes métodos de visualización 3D. Adicionalmente, emplea tecnología NVIDIA para la visión en 3D, que ofrece la posibilidad de ver el LR sin necesidad de un monitor o proyector 3D. Por otro lado, al transmitir en 3D el funcionamiento de un proceso industrial a escala, se evidenció una mayor facilidad en la adquisición de conocimiento por las personas que lo utilizaron, dado que se creó un ambiente realista, con un mayor confort y con mayor interacción visual que uno en 2D.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Schild, S. Seele y M. Masuch, “Integrating Stereoscopic Video in 3D Games”, *Lecture Notes*

- in Computer Science*, vol. 6927, pp. 124-135, 2011.
- [2] P. Zanaty, D. Brscic y Z. Frei, "3D visualization for intelligent space: Time-delay compensation in a remote controlled environment", *Conference on Human System Interactions, 2008*, Krakow, 2008.
 - [3] H. Wenshan, Z. Hong y D. Qijun, "Design of web-based 3D control laboratory", *2nd. International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP)*, Harbin, 2011.
 - [4] J. F. Ramírez, "Videostreaming y videoconferencia: herramientas actuales para la teleenseñanza", Diatel, Madrid, 2009.
 - [5] A. Leleve, H. Benmohamed, P. Prevot y C. Meyer, "Remote laboratory towards an integrated training system", INSA, Lyon, Francia, 2007.
 - [6] M. Hoecker y M. Kunze, "An on-demand scaling stereoscopic 3D video streaming service in the cloud", *Journal of Cloud Computing*, 2013.
 - [7] J. Kimball, T. Wypych y F. Kuester, "Exploration with live stereoscopic 3D video in mixed reality environments", *Aerospace Conference, 2014 IEEE*, Montana, 2014.
 - [8] C. Ceglie, G. Piro, D. Striccoli y P. Camarda, "Performance evaluation of 3D video streaming services in LTE-advanced networks", *Wireless Networks*, 2014.
 - [9] C. A. Jara, F. A. Candelas y F. Torres, "Virtual and remote laboratory for robotics e-learning", *INV - AUROVA - Comunicaciones a Congresos Internacionales*, Alicante, 2008.
 - [10] N. Doulamis, A. Doulamis, Y. Avrithis, K. Ntalianis y S. Kollias, "Efficient summarization of stereoscopic video sequences", *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 10, n° 4, pp. 501 - 517, 2000.
 - [11] M. F. López, S. G. Rodríguez, J. P. Ortiz, V. G. Ruiz e I. García, "Técnicas para la codificación escalable de vídeo", Universidad de Almería, Almería, 2013.
 - [12] M. Lang, A. Hornung, O. Wang, S. Poulakos, A. Smolic y M. Gross, "Nonlinear disparity mapping for stereoscopic 3D", *ACM Transactions on Graphics*, 2010.
 - [13] P. Wimmer, "Stereoscopic Metadata Format Specification", Linz, 2012.
 - [14] C. Ming-Jun, "Study of subject agreement on stereoscopic video quality", *2012 IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation (SSIAI)*, Nuevo México, 2012.
 - [15] I. M. Capell, "Sistema estereoscópico para teleoperación asistida y supervisión de tareas robotizadas", Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2006.
 - [16] M. Bishop, K. Hyojin y S. Viswanathan, "Live capture, rectification, and streaming of stereoscopic internet video for casual users", *3DTV-Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV-CON)*, 2012, Zurich, 2012.
 - [17] J. Fombona, "Streaming de vídeo a través de internet", Universidad de Oviedo, Oviedo.
 - [18] R. Piroddi, Algorithm Engineer, Snell Ltd, "Stereoscopic 3D Technologies", Snell, 2010.
 - [19] J. P. Quintero y C. A. Castro, "Evaluación de servidores de streaming de video orientados a dispositivos móviles", Universidad de Antioquia, Medellín, 2006.
 - [20] Universidad Politécnica de Valencia, "Transmisión en internet: streaming de audio y vídeo", Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2012.
 - [21] D. Hontoria, "Implementación de una aplicación de *video-on-demand* sobre redes de fibra óptica", Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2009.
 - [22] N. Hernández, "Sistema de producción a escala", Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, 2013.
 - [23] NVIDIA, "3D Vision Live", mayo 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dvisionlive.com/>. [Último acceso: 10 septiembre 2014].
 - [24] T. Greenfield, "Programmer Payback", WordPress, 16 agosto 2011. [En línea]. Disponible en: <http://programmerpayback.com/>. [Último acceso: 15 septiembre 2014].

A NEW INDEX FOR DAMAGE IDENTIFICATION IN ACTIVE BEAMS WITH ELECTROMECHANICAL IMPEDANCE TECHNIQUE (EMI) APPROACH TO SHM

Un nuevo índice para la identificación de daño en vigas activas con la Técnica de la Impedancia Electromecánica (EMI) enfocada al Monitoreo de la Integridad Estructural (SHM)

ABSTRACT

In this study, there is shown an experimental analysis for detecting structural damage or modification in active beams (piezoelectric transducers (PZT) bonded) with electromechanical impedance (EMI) technique. Two experiments were carried out to identify damage by means of the measurements of admittance obtained by PZT, which were bonded to the studied beams. A damage index is proposed to identify changes in the studied beams, establishing a metric measure for electrical admittance variation. The proposed damage index is based on ellipses obtained from covariance matrices calculated with conductance (G) and susceptance (B) measurements. The results show that using the new index, the damage identification is a feasible procedure in our study case.

HÉCTOR A. TINOCO

Mechanical engineer, M.Sc.
Professor
Universidad Autónoma de Manizales-UAM
htinoco@autonoma.edu.co

DAIRON J. MARULANDA

Mechanical engineer.
Maintenance Coordinator
Jose16mar@gmail.com

KEYWORDS: damage detection, piezoelectric, EMI technique, AD5933

RESUMEN

En este estudio se muestra un análisis experimental para detectar daños o modificación estructural en vigas (transductores piezoeléctricos (PZT) pegados) con la técnica de la impedancia electromecánica (EMI). Dos experimentos se llevaron a cabo para identificar daños con las medidas de admitancia obtenidas por los PZT, los cuales fueron pegados a las vigas estudiadas. Se propuso un índice de daño para identificar cambios en las vigas estudiadas, estableciendo una medida métrica para la variación de la admitancia eléctrica. El índice de daño propuesto se basa en elipses obtenidas a partir de las matrices de covarianza calculadas con las mediciones de conductancia (G) y susceptancia (B). Los resultados muestran que el uso del nuevo índice de daño es un procedimiento factible para identificar daño en nuestro caso de estudio.

Palabras clave: identificación de daño, piezoeléctrico, técnica EMI, AD5933.

1. INTRODUCTION

Piezoelectric transducers (PZT) have begun to increase its reputation in different areas of structural mechanics in the last few years, partially because they can be used as sensors and as actuators in smart structures [1-3]. In structural monitoring (SM), PZT are embedded or bonded to structures by means of adhesives or different methods of joining. These PZT are implemented on the structure to measure and to act by means of local strains associated to a local degree of freedom. The possibility of sensing and acting has advantages with respect to other measuring techniques, and for that reason different methodologies of damage detection have been implemented for SM with PZT, such as structural health monitoring (SHM) [4-5] and nondestructive evaluation (NDE) [6-9]. These methodologies have been applied in

different engineering areas such as aerospace, civil, mechanical, among others.

Within the SHM, different techniques have arisen to detect, quantify, localize and classify the damage in structures. In damage identification, the electromechanical (EM) impedance method has been a strong candidate to support this field, due to the fact that experimental implementation is an easy process and it is possible to capture structural changes in the electrical impedance of PZT [19]. The EM impedance method couples the structural impedance with the electrical impedance measured as described by [3-4,18]. Both mechanical impedances are coupled inside electrical signatures emitted by PZT, since when it acts as actuator (voltage applied – electric field) it deforms the structure and it is able to read the structural response in current

way. These measurements (voltage-input/current-output) are related for obtaining the electromechanical impedance, as shown by [18-19]. Structural damage can be identified through characterized spectral changes using statistical or probabilistic indexes, as it was carried out by [20]. The dynamic response in the PZT is visualized by means of the EM admittance, which is a function of the mechanical parameters of the structure and PZT, such as stiffness, mass, damping, etc. The changes in the EM admittance signatures (which are inverse to the EM impedance) indicate that the initial structural conditions were modified. In particular, in the last decade the use of EM impedance technique has been wide in SHM and NDE [21]. The advantages of the EMI technique include fast dynamic response, long-term durability, negligible ageing, high sensitivity and immunity to ambient noise.

To measure the electrical impedance of PZT, there are different options, as for example Agilent E4980A Precision LCR meter [10], Wayne Kerr Precision and HP 4192A impedance analyzer [11]; also new methods of impedance measurements applying fast Fourier transform (FFT) analyzer and small current measuring circuit has been developed by [12-13]. According to [13], these analyzers are much more common and less expensive than impedance analyzers. Furthermore, this new option has benefits of being portable and it can be implemented easily on a computer chip for its size. Another, excellent option is to use the integrated circuit AD5933 (Analog Devices), developed in 2005 by Analog devices. This integrated circuit allows the direct analysis of frequencies lower than 100 kHz [14]. This system is adequate to carry out high impedance spectroscopy in the range of 10 Hz to 100 KHz. Communication software is amiable and easy to use. In terms of cost, it is a great option because it is cheap, around 100 USD. For this reason, the integrated circuit AD5933 was chosen to measure electrical impedance and phase in this study. Some applications of impedance spectroscopy can be found in [15-16].

This article presents an experimental analysis for identifying structural damage in an active beam (PZT bonded), using EM impedance technique. Two tests were carried out to demonstrate that the identification technique is feasible in a real context. A new damage index (EDI index) was proposed with the eigenvalues obtained from covariance matrices and error ellipses to differentiate a damaged beam from a beam in initial conditions (beam in a good state).

2. THEORETICAL BACKGROUND

2.1 Electromechanical Impedance Principles (EM)

The electrical admittance $Y_p^E(\omega)$ of a circuit is the relation between current $i(\omega)$ and voltage $V(\omega)$. $Y_p^E(\omega)$ is composed of a real part G called conductance and an

imaginary part B called susceptance. The inverse of electrical admittance is the electrical impedance $Z_p^E(\omega)$, as described below

$$Y_p^E(\omega) = \frac{i(\omega)}{V(\omega)} = \frac{1}{Z_p^E(\omega)} = G(\omega) + B(\omega)j, \quad (1)$$

where ω is the frequency. In Figure 1, there is shown a simple model that couples a mechanical system with an electrical system. [17] determined electromechanical admittance coupling the dynamic system shown in Figure 1, obtaining that

$$Y_p^E(\omega) = 2\omega j \frac{w_{pzt}l}{h_{pzt}} \left[\bar{e}_{33}^\sigma - d_{31}^2 \bar{y}^E + \left(\frac{Z_p^M(\omega)}{Z_s^M(\omega) + Z_p^M(\omega)} \right) d_{31}^2 \bar{y}^E \left(\frac{\tan(kl)}{kl} \right) \right], \quad (2)$$

where, h_{pzt} is the thickness of a PZT patch, w_{pzt} is the width of the host structure, d_{31} is the piezoelectric strain coefficient corresponding to 1 (x) – 3 (y) coordinates, $\bar{y}^E = y^E(1 + \eta)$ is the complex Young's modulus of the PZT patch at constant electric field and $\bar{e}_{33}^\sigma = e_{33}^\sigma(1 + \delta)$ is the complex electric permittivity of the PZT material at constant stress. η and δ denote both mechanical loss and dielectric loss factors, k is the wave number and it is given by

$$k = \omega \sqrt{\frac{\rho}{y^E}}, \quad (4)$$

ρ is the density of piezoelectric material, ω is the angular frequency and $Z_p^M(\omega)$ is the mechanical impedance of the PZT patch, which can be calculated by

$$Z_p^M(\omega) = \frac{k w_{pzt} h_{pzt} \bar{y}^E}{j \omega \tan(kl)}. \quad (5)$$

For the structure, $Z_s^M(\omega)$ represents the mechanical impedance of host structure. The mechanical impedance is given in terms of the frequency as

$$Z_s^M(\omega) = \frac{K_s^M(\omega)}{j\omega}, \quad (6)$$

where $K_s^M(\omega)$ is the dynamic stiffness of the structure and it is represented by

$$K_s^M(\omega) = \frac{F_s(\omega)}{X_s(\omega)}, \quad (7)$$

hence, $F(\omega)$ is the applied force and $X(\omega)$ is the displacement of a point on the structure.

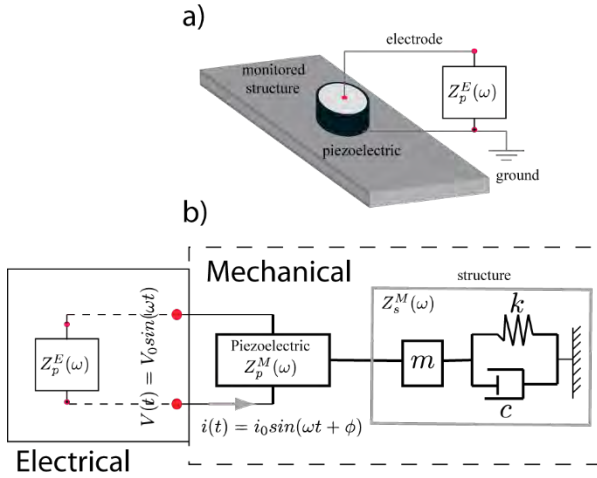


Figure 1. a) Electrical impedance of a piezoelectric patch bonded to a host structure b) Coupled electromechanical system of one degree of freedom (model proposed by [17])

In modal analysis, the mechanical impedance of a system is represented by $Z_{sij}^M(\omega)$ which is symmetrical. It is important to know that the mechanical impedance reflects the properties of a linear vibrating system, similar to the natural frequencies and mode shapes of the system. Therefore, they do not depend upon external forces. The dependency can occur only if the dynamic system has a nonlinear behavior.

2.2 New index of damage (EDI) from a normal distribution

The normal or Gaussian distribution is known in the probability theory, where it represents a function which describes the probability that a real data is found between certain intervals. Gaussian distribution function is written as

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (8)$$

where μ is mean, σ is standard deviation and x are data. To establish an index that correlates two measurements, the following case is considered, let's suppose that x_{ref} is the base measurement (which can be G_0 or B_0 , initial measurement) and x_{me} is another monitoring measurement for these measurements, the distribution functions are computed as $f(x_{ref}, \mu, \sigma)$ and $f(x_{me}, \mu, \sigma)$. From the distributions the covariance matrix is determined as

$$C = \begin{bmatrix} \sigma_{ref}^2 & \sigma_{(ref)(me)} \\ \sigma_{(me)(ref)} & \sigma_{me}^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

where σ_{ref}^2 , σ_{me}^2 are the variances and $\sigma_{(ref)(me)}$, $\sigma_{(me)(ref)}$ are covariances. By means of covariance matrix, an eigenvalues problem is established, such that

$$Cv - \lambda Iv = 0, \quad (10)$$

where v is an eigenvector, λ is an eigenvalue and I is the identity matrix. The eigenvalues λ_{min} and λ_{max} can delimit an oriented ellipse in the principal direction defined by eigenvectors v , then the principal direction is calculated as

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\beta} \frac{2\sigma_{(ref)(me)}}{\sigma_{ref}^2 - \sigma_{me}^2} \right). \quad (11)$$

Where β is a scale factor. For an elliptical confidence domain of 95%, this means 1σ error ellipse, it is necessary to increase the principal axes, such that λ_{min} and λ_{max} are augmented by a factor of $\alpha = 2.4477$ (chi square), as shown in Figure 2, in which, there is observed the ellipse obtained with eigenvalues. To establish a damage index from the ellipse, the following expression represents a metric in a dimensional space less than 100%, such that

$$EDI = 100 \frac{\int F(\mu_0, \mu, \alpha\lambda_{max}, \alpha\lambda_{min}) dA}{Y_{max} Y_{max}}. \quad (12)$$

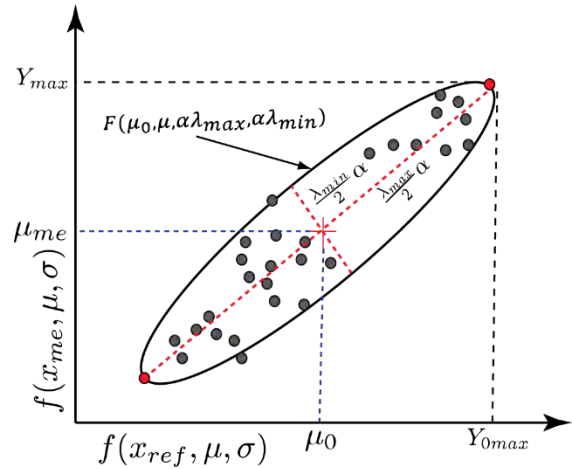


Figure 2. Error ellipse obtained from covariance matrix.

The EDI index proposed, it represents a ratio of the ellipse area over the rectangle delimited by the maximum values.

3. EXPERIMENTAL TEST

For the experimental analysis, an evaluation board AD5933 of Analog Devices [14] was used to measure electrical impedance and phase angle. The experimental test was carried out in two identical beams of stainless steel 304L with dimensions of 152.2 mm, 47.5 mm and 1.2 mm (length, width and thickness), as shown in Figure 3. For the test, two PZT were bonded to each beam and located symmetrically, as depicted in the Figure 3. In

every sample, each PZT was labeled with letter A and B. The first test is designed for six damage intensity such that a sphere of 4.76 mm is used to mark the beam. Each mark is driven during 30 seconds, with the aim to augment in six stages the damage intensity. In the second test, the damage is carried out in two stages; first, a mark is made with a cone of 60° with 4.76 mm of diameter to a depth of 1 mm in the same location of the sample 1. In the second stage, the damage made a hole of 4.76 mm of diameter over the conic mark. The test were carried out over a wood without any constraint, this represents a free beam. The connectivity scheme of the experimental test is depicted in Figure 3.

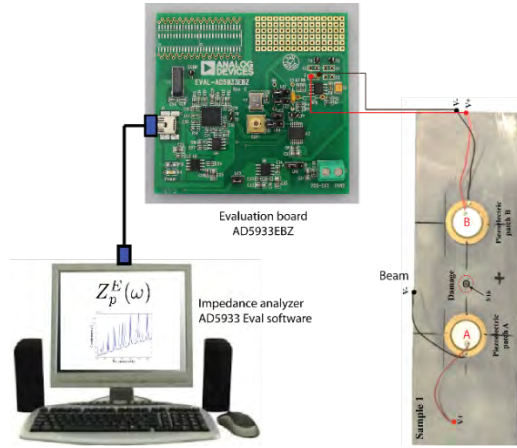


Figure 3. Experimental setup.

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1 TEST 1: Identification of structural modification

For the experimental test, 16 measures were obtained with evaluation board AD5933 for each PZT (A and B), the measurements are conformed by phase angle and magnitude of electrical impedance in the range 0-50KHz. From admittance (see Equation 1), conductance G and susceptance B , signatures are determined applying Equation (1). Figure 4 shows eight electrical signatures of conductance and eight of susceptance for the PZT A (see Figure 3) and the PZT B (see Figure 3) as shown in Figure 4. The measurements are classified as free PZT (debonding), beam without damage with PZT bonded, and six marks on the beam with a metallic sphere placed in a mototool at 35000 rpm during 30 seconds on the beam. The damage is classified as damage I, II, III, IV, V and VI. The information shown in Figure 1 is organized in the following way: Figures 1a), b) represent conductance G and susceptance B of the PZT A, and Figures 1c), d) represent the same variables for the PZT B. Commonly in the literature on SHM, damage indexes are quantified from variation in G and B , but the variations are estimated with G to define a baseline of the

damage, this argument is based on previous studies. According to different authors [4,19-21], the real part (G) of admittance is most sensitive to changes when the structure is modified. Therefore, a baseline is calculated for G .

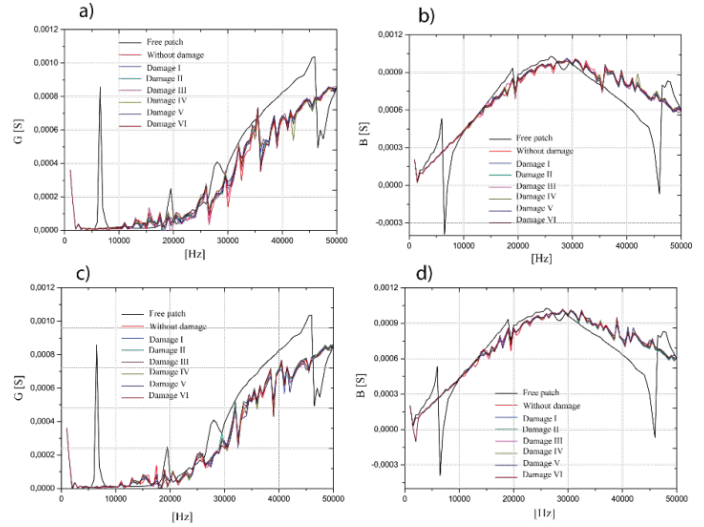


Figure 4. a) Conductance G , patch A. b) Susceptance B , patch A. c) Conductance G , patch B. d) Susceptance B , patch B.

The variation index for the conductance is defined as follows

$$RM = 100 \left| \frac{G(\omega)}{G_0(\omega)} - 1 \right|, \quad (13)$$

where $G_0(\omega)$ and $G(\omega)$ are conductances of PZT without and with damage. Results determined with the RM index are shown in Figure 5. It is observed that when the damage is increased, there is an increasing trend from 25% to 40% for the conductance of the PZT A. On the other hand, the PZT B has a mean of 35% and there is a small linear trend in the RM index. This shows that the structural changes can be monitored. However, if a baseline of damage is proposed to detect in situ any structural modification, this should be defined according to an experimental analysis.

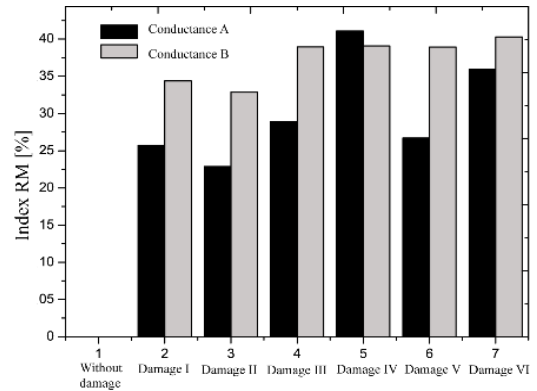


Figure 5. Damage index RM, see Equation (13).

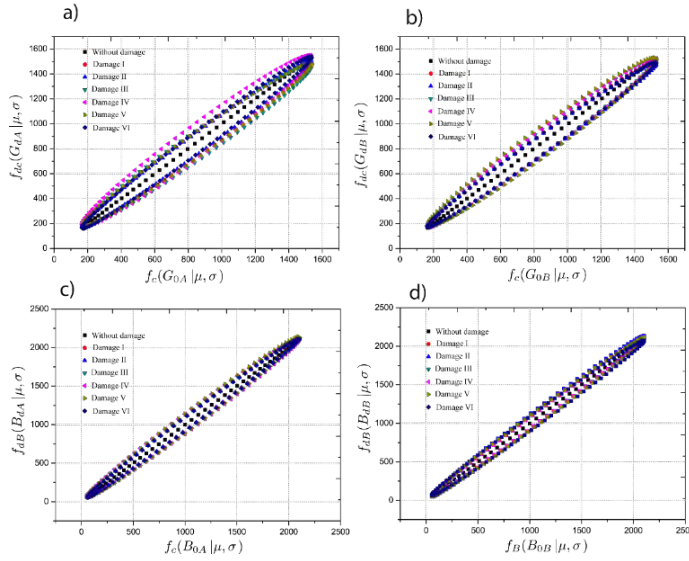


Figure 6. Error ellipses with: a) Conductance G, PZT A. b) Conductance G, PZT B. c) Susceptance B, PZT A. d) Susceptance B, PZT B.

As explained before (see item 2.2), a damage index was proposed from covariance matrices obtained by normal distribution functions. Relations between conductances $G_0(\omega)$ and $G(\omega)$, susceptances $B_0(\omega)$ and $B(\omega)$ are used to model the ellipse error of the PZT A and B, which are fundamental to compute the EDI index (Equation 12). The new damage index is obtained from Equation (12) and the results are exposed in Figure 7. In this figure, the percentages of variation of the new index are shown. It is seen that the beam without damage is the baseline, and it is observed how the index increases in each stage of damage. For example, indexes obtained with conductance A and B show a trend in intensity. This means that the damage identification can be done when the increments of the index are continuous in the monitoring. A similar case is seen with the susceptance, since the EDI index shows variations when damage stages are introduced. In a real context it is possible to differentiate when the beam presents a structural change.

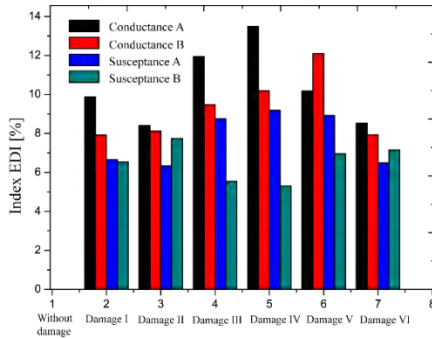


Figure 7. EDI Index for the conductance and susceptance of PZT A and B.

From Figure 7, it is concluded that the dimensional space of EDI index is valid for the conductance G and the

susceptance B, since the differences are smaller in variational terms.

4.2. TEST 2: Identification of structural modification

Figure 8a), b) shows the error ellipses for the test carried out in the specimen 2. If the ellipses are compared in the way that the damage is induced, the area of each ellipse begins to increase, when there is damage. Consequently, the EDI index increases (see Equation (12)), also.

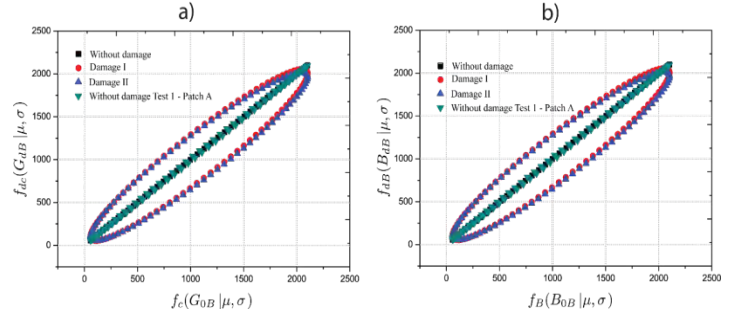


Figure 8. Error ellipses with: a) Conductance G, PZT B. b) Susceptance B, PZT B.

Figure 9 shows the EDI index obtained from susceptance and conductance of PZT B (test 2). Damages induced in the specimen 2 are compared with PZT A (without damage) used in the test 1. It is observed that conductance EDI index is more sensitive than susceptance EDI index for being bigger. If EDI index is compared to the baseline of the test 1 (PZT A), it can be seen that EDI index is low, around 3% and 1%, for G and B, respectively. If EDI index is delimited by a damage baseline, for example 7 %, it could be considered that when EDI Index is bigger than this value, a damage alert can be emitted. Thus it will be a real application in the context of damage identification.

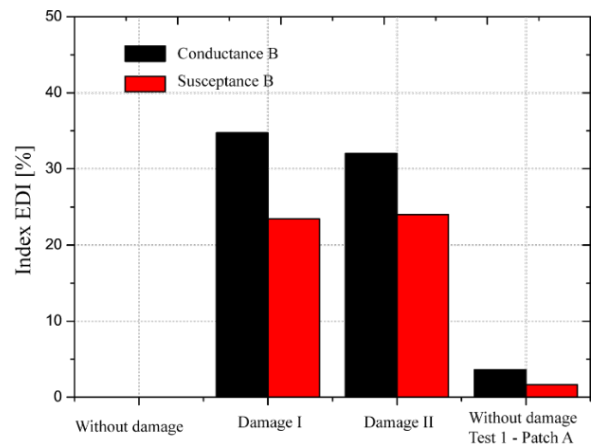


Figure 9. EDI Index for the conductance and susceptance of PZT B of test 2.

5. CONCLUSIONS

The present experimental study tested the feasibility of using EM impedance technique based on SHM for monitoring structural damage in active beams. Two specimens were made with the aim to demonstrate the damage identification. In both cases (two specimens), structural change was identified using two different indexes, such that one of them was proposed to establish a dimensional space for the real and imaginary part of the electrical admittance of each PZT bonded to the beam. We may pointed out that this study can be extrapolated to a real context to carry out the damage identification.

6. REFERENCES

- [1]. S. C. Liu, M. Tomizuka, and G. Ulsoy, "Strategic Issues in Sensors and Smart Structures", *Structural Control and Health Monitoring*, vol.13, no. 6, pp. 946–957, 2006.
- [2]. H. A. Tinoco, A. L. Serpa, and A. M. Ramos, "Numerical Study of the Effects of Bonding Layer Properties on Electrical Signatures of Piezoelectric Sensors", *Mecanica Computacional*, vol. 29, no. 86, pp. 8391-8409, 2010.
- [3]. H. A. Tinoco and A. L. Serpa, "Bonding influence in the electromechanical (EM) admittance of piezoelectric sensors bonded to structures based on EMI technique", in Proc. 2011 *Proceedings of the 14th International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics–XIV DINAME*.
- [4]. V. Giurgiutiu, A. Reynolds, and C. A. Rogers, "Experimental investigation of E/M impedance health monitoring for spot-welded structural joints", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 10, no. 10, pp. 802–812, 1999.
- [5]. D. Montalvão, N. M. M. Maia, and A. M. R. Ribeiro, "A review of vibration-based structural health monitoring with special emphasis on composite materials", *The Shock and Vibration Digest*, vol. 38, no. 4, pp. 295–324, 2006.
- [6]. S. Bhalla, C. K. Soh, and Z. X. Liu, "Wave propagation approach for NDE using surface bonded piezoceramics", *NDT and E International*, vol. 38, no. 2, pp. 143–150, 2005.
- [7]. H. A. Tinoco and A. L. Serpa, "Voltage relations for debonding detection of piezoelectric sensors with segmented electrode", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 31, pp. 258-267, 2012.
- [8]. H. A. Tinoco, A. L. Serpa, "Experimental Detection of Debonding of Piezoelectric Transducers with the Segmented Electrode", in Proc. 2012 *First International Conference on Advanced Mechatronics, Design, and Manufacturing Technology (AMDM 2012)*, Pereira, Colombia, pp 1-6.
- [9]. Agilent Technologies, *Impedance Measurement Handbook*, Palo Alto, California: Agilent Technologies, 2003.
- [10]. Agilent Technologies, *A Data Sheet of Agilent E4980A Precision LCR Meter*, USA: Agilent Technologies, 2008. [Online]. Available: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-4435EN.pdf> (accessed on March 20, 2008).
- [11]. HP LF 4192A, *Impedance Analyzer Operation Manual*, Tokyo, Japan: Hewlett Packard, 1996.
- [12]. D. M. Pearis, B. L. Grisso, R. N. Margasahayam, K. R. Page, and D. J. Inman, "Proof-of Concept Application of Impedance-based Health Monitoring on Space Shuttle Ground Structures", in Proc. 2004a *Proceedings of SPIE*, San Diego, CA, USA, vol. 5394-15, pp. 99-107.
- [13]. D. M. Peairs, G. Park and D. J. Inman, "Improving Accessibility of the Impedance-based Structural Health Monitoring Method", *Journal Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 15, pp. 129-139, 2004b.
- [14]. Analog Devices AD5933 Product web site. Accessed on 2010-01-15; [Online]. Available from: <http://www.analog.com/en/AD5933/productsearch.html>.
- [15]. J. Ferreira, F. Seoane, A. Ansedé, and R. Bragos, "AD5933-based spectrometer for electrical bioimpedance applications", *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 224, no. 1, 012011, Apr. 2010.
- [16]. H. Berney and J. J. O’Riordan, "Impedance measurement monitors blood coagulation", *Analog Dialogue*, vol. 42, no. 3, pp. 42-08, 2008.
- [17]. Y. G. Xu and G. R. Liu, "A modified electro-mechanical impedance model of piezoelectric actuator-sensors for debonding detection of composite patches", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 13, no. 6, pp. 389-396, 2002.
- [18]. M. Gresil, L. Yu, V. Giurgiutiu, and M. Sutton, "Predictive modeling of electromechanical impedance spectroscopy for composite materials", *Structural Health Monitoring*, vol. 11, no. 6, pp. 671-683, 2012.
- [19]. V. G. M. Annamdas and C. K. Soh, "Application of electromechanical impedance technique for engineering structures: review and future issues", *Journal of Intelligent material systems and structures*, vol. 21, no. 1, pp. 41-59, 2010.
- [20]. V. Pavelko, I. Ozolinsh, S. Kuznecovs, and I. Pavelko, "Structural health monitoring of aircraft structure by method of electromechanical impedance", in Proc. 2011 *Proceeding of the 6th NDT in Progress 2011 International Workshop of NDT Experts*.
- [21]. V. Giurgiutiu and C. A. Rogers, "Electro-mechanical (E/M) impedance method for structural health monitoring and non-destructive evaluation", *Structural Health Monitoring—Current Status and Perspective*, pp. 18-20, 1997.

PREDICCIÓN NEURONAL DE CONSUMO ENERGÉTICO ANTE VARIACIONES DE TRÁFICO VEHICULAR

Energy consumption prediction faced to vehicular traffic changes by neuronal network

RESUMEN

El aumento del parque automotriz en las ciudades, se ha convertido en un factor de importancia, para el análisis que se produce en las empresas del sector transportador, en aspectos específicos como el del consumo energético. Este artículo presenta un algoritmo basado en inteligencia artificial, para la predicción del consumo de combustible en un vehículo, para un trayecto determinado en la ciudad de Bogotá, teniendo en cuenta las variaciones del tráfico. Con esta herramienta de predicción es posible determinar el consumo energético promedio del vehículo e inferir posibles causas de falla del mismo.

Palabras clave: consumo energético, modelado de tráfico, red neuronal.

ABSTRACT

The increase of automotive park in cities has become a factor of importance for the analysis by the transportation sector companies, in specific aspects such as energy consumption. This paper presents an algorithm to predict fuel consumption in a urban vehicle, through neural networks, for a given path in Bogotá, taking into account changes in traffic. This prediction tool may determine the average energy consumption of the vehicle and infer possible causes of failure thereof.

Keywords: Energy consumption, neural network, traffic modeling.

1. INTRODUCCIÓN

El tráfico en las vías de cualquier ciudad del mundo es un aspecto que está tomando mucha importancia en temas relacionados con vehículos automotores, tales como el consumo energético el cual es influenciado más que todo por los cambios de aceleración y desaceleración, ya que una alta frecuencia de este comportamiento aumenta considerablemente el gasto de combustible que, de igual forma, influye en la contaminación [1]. Esta contaminación afecta en gran manera la salud pública, gracias a las emisiones de humo y dióxido de azufre (SO₂), entre otros [6].

El consumo de combustible tradicionalmente se asocia a factores como el estado del vehículo y el tráfico existente, constituyendo el valor más significativo en costo de operación de un sistema de transporte [8].

Se han realizado varios desarrollos en torno a este tema, por ejemplo, en [2] se muestra un algoritmo de simulación para un modelo de flujo de tráfico con el fin de comprender el comportamiento en un contexto urbano, maximizando el flujo vehicular y minimizando las congestiones, los accidentes y la polución.

Por otro lado, en [3] se presenta un algoritmo de asignamiento dinámico de tráfico basado en datos adquiridos desde dispositivos avanzados, unificando las variables de tiempo con el fin de obtener una red de vías

con tráfico balanceado. Al usar información de tiempo real el algoritmo puede evitar secciones de congestión permitiendo un avance vehicular fluido.

En varias investigaciones se han realizado algoritmos de predicción de tráfico, en las que se hace uso de modelos macroscópicos, microscópicos y sub-microscópicos [4]. Con el primer modelo se observa el comportamiento general de flujo y densidad del tráfico; con el segundo se observa el comportamiento vehículo a vehículo, observando la forma como un vehículo realiza el seguimiento del siguiente, y el último observa el comportamiento individual vehicular, por ejemplo, la aceleración, el frenado y el cambio de dirección, entre otras.

El tráfico en la ciudad de Bogotá es bastante congestionado debido a que las vías no son suficientemente amplias para la cantidad de vehículos y motocicletas. Sumado a este problema, la calidad de las vías y la cultura ciudadana de las personas intensifican el caos, ya que las personas quieren llegar rápido a sus destinos sobrepasando las normas viales establecidas. Los problemas anteriormente mencionados intensifican la cantidad de arrancadas y tiempos de trayecto, provocando un aumento en el consumo de combustible.

La estructura del artículo es la siguiente: en la sección 2 se describe el tramo seleccionado, las variables que influyen en el recorrido y el método para crear la red

JOHN VILLAIZÁN R.

Ingeniero en Mecatrónica
Asistente de investigación
Universidad Militar Nueva Granada
u1801350@unimilitar.edu.co

RÓBINSON JIMÉNEZ M.

Ingeniero electrónico, M. Sc.
Investigador
Universidad Militar Nueva Granada
robinson.jimenez@unimilitar.edu.co

OLGA RAMOS S.

Ingeniera electrónica, M. Sc.
Investigadora
Universidad Militar Nueva Granada
olga.ramos@unimilitar.edu.co

neuronal; en la sección 3 se muestran las conclusiones y recomendaciones acerca de los resultados de consumo haciendo uso del algoritmo genético.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Debido a que el tráfico de cada día no se puede predecir, ya que es aleatorio por diferentes variables como: restricciones de movilidad, accidentes y flujo vehicular, se ve la necesidad de que las empresas puedan conocer un promedio de consumo de combustible con dichas variaciones con el fin de saber si es necesario realizar mantenimientos preventivos, ya que el aumento de consumo de combustible está ligado a posibles daños en el motor, generando contaminación. Además, para las empresas de transporte es necesario conocer el trato que se le da a sus vehículos y uno de los principales síntomas de mal manejo es el aumento de consumo de combustible.

Inicialmente, se procede a tomar datos estadísticos acerca de la información de los desplazamientos en un tramo de la ciudad de Bogotá, en vehículos automotores de servicio urbano, el cual es uno de los medios más utilizados por la ciudadanía.

Se escoge un tramo para realizar la estadística de desplazamiento vehicular, este trayecto se escoge debido a que es una de las vías más importantes de la ciudad y una de las más transitadas. El punto de inicio se encuentra en la Carrera 68 No 22 y finaliza en la Carrera 11 No 100, la distancia entre estas dos locaciones es de 9,2 Km, ver figura 1.

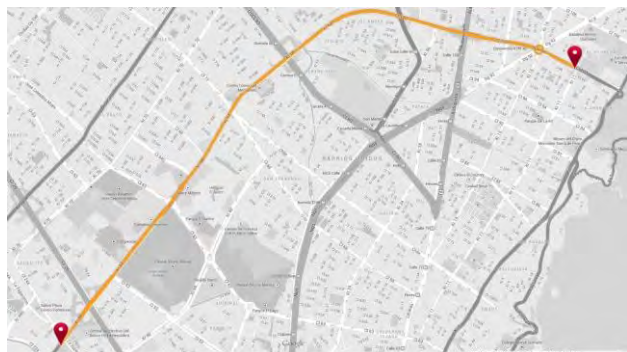


Figura 1. Tramo Calle 22 - Calle 100, Bogotá-Colombia.

Se realiza un muestreo durante el recorrido en un horario comprendido entre las 6:30 a. m. a 7:00 a.m., tomando datos del tiempo total del recorrido, número de veces de arranque durante cada minuto, el tipo de vehículo y la información del motor, realizando en total 40 observaciones en días diferentes. Los datos de consumo se obtienen realizando un promedio del gasto en combustible con relación a la distancia de los recorridos realizados normalmente por buses urbanos (Isuzu 4HF1 4.3cc y MB OM904LA 4.3cc), y ajustando el valor con la

distancia del tramo seleccionado, los cuales tienen un gasto de combustible aproximado de 0.0001193 g/km.

Se realizaron varias tablas de tabulación, la primera consistió en registrar valores generales durante el desplazamiento, como el tiempo total del recorrido y la totalidad de arranques, con esto se logra obtener un promedio de veces que los vehículos deben frenar y arrancar cada minuto. Así mismo, registrar la marca del vehículo y lograr obtener información técnica del mismo (tipo de motor), ver tabla 1. Son en total 40 muestras de las diferentes observaciones diarias, mostrando en la tabla un segmento del mismo.

Muestra	Tiempo [min]	Arranque [Veces]	Promedio [Veces/min]	Tipo de Vehículo	Motor
1	50	66	1,32	MB Atego	MB OM904LA 4.3cc
2	55	71	1,29090909	Chevrolet NPR	Isuzu 4HF1 4.3cc
3	53	72	1,35849057	Chevrolet NPR	Isuzu 4HF1 4.3cc
4	51	74	1,45098039	MB Atego	MB OM904LA 4.3cc
5	48	61	1,27083333	Chevrolet NPR	Isuzu 4HF1 4.3cc
6	50	81	1,62	Chevrolet NPR	Isuzu 4HF1 4.3cc
7	62	97	1,56451613	Chevrolet NPR	Isuzu 4HF1 4.3cc
8	60	86	1,43333333	MB Atego	MB OM904LA 4.3cc
9	59	79	1,33898305	MB Atego	MB OM904LA 4.3cc
10	57	67	1,1754386	MB Atego	MB OM904LA 4.3cc
11	71	81	1,14084507	Chevrolet NPR	Isuzu 4HF1 4.3cc
12	63	74	1,17460317	MB Atego	MB OM904LA 4.3cc
13	54	71	1,31481481	Chevrolet NPR	Isuzu 4HF1 4.3cc
14	58	72	1,24137931	Chevrolet NPR	Isuzu 4HF1 4.3cc
15	60	78	1,3	MB Atego	MB OM904LA 4.3cc

Tabla 1. Segmento de 15 datos generales del recorrido.

En la tabla 2 se registraron la cantidad de frenadas-arranque que realizaron los vehículos urbanos en cada minuto del recorrido. Los datos que se presentan en cero reflejan estancamientos en el tráfico. Cada una de la cuarenta muestras se registra minuto a minuto con un rango final de tiempo del recorrido el cual está comprendido entre 47 y 75 minutos.

Muestra	1	2	3	4	5
Tiempo					
1	2	3	3	2	2
2	3	2	0	2	0
3	1	2	3	2	1
4	0	0	2	1	0
5	1	2	2	1	3
6	1	1	1	1	1
7	2	2	1	3	3
8	1	1	0	1	1
9	1	2	2	0	2
10	3	1	3	1	2
11	0	3	1	1	0
12	1	0	2	3	1
13	3	0	1	2	3
14	2	3	2	0	1
15	1	0	0	0	1

Tabla 2. Segmento de 15 datos específicos de arranque en cada minuto del recorrido.

En la tabla 3 se presentan los datos promedio de las anteriores tabulaciones del recorrido. Haciendo uso de la velocidad, se calcula tanto el tiempo como el consumo presentado cada minuto.

Tiempo	Arranques [Veces]	Vel. Promedio [m/s]	Dist. Recorrida [m]	Consumo [g/km]
0	0	0	0	0
1	2	6,94	416,4	0,0496765
2	1	11,45	687	0,0819591
3	0	0	0	0
4	2	5,74	344,4	0,0410869
5	3	3,65	219	0,0261267
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	2	8,42	505,2	0,0602704
9	3	4,956	297,36	0,035475
10	2	6,94	416,4	0,0496765
11	0	0	0	0
12	3	4,35	261	0,0311373
13	3	5,72	343,2	0,0409438
14	2	6,23	373,8	0,0445943
15	0	0	0	0

Tabla 3. Segmento de 15 datos específicos de arranque, velocidad promedio, distancia recorrida y consumo de combustible en cada minuto.

Se toma el consumo de combustible en función de las variables de tiempo (t), arranques (arr), velocidad (v), distancia (d) y tipo de motor ($tmotor$) (1). Estos datos son tabulados como se mencionó anteriormente, logrando resultados de consumo promedio con el fin de entrenar la red neuronal como datos de salida. El tipo de motor en este caso se deprecia debido a que la gran mayoría de buses poseían especificaciones similares. Ya que con la velocidad promedio y el número de arranques durante el trayecto, la distancia recorrida se deprecia también.

$$Q = f(t, arr, v, d, tmotor) \quad (1)$$

Se realiza un entrenamiento de una red neuronal con el fin de obtener un algoritmo de consumo a partir de un comportamiento de tráfico variable, utilizando los datos previamente mencionados. Se utiliza el módulo de redes neuronales de MatLab®, en el que los datos fueron aleatoriamente divididos en tres secciones: entrenamiento, validación y pruebas; cada una con porcentajes de iteración de 75%, 20% y 5% respectivamente de un total de 60 iteraciones.

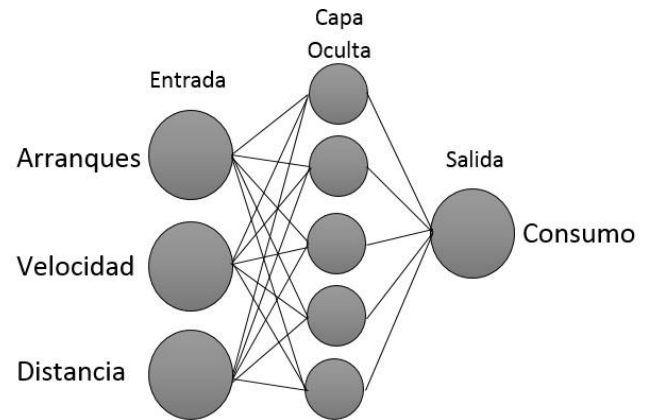


Figura 2. Parámetros de entrada y salidas de la red neuronal

El *software* utiliza el algoritmo iterativo Levenberg-Marquardt para el entrenamiento de la red neuronal, el tipo de red elegido es *Feed-Forward backprop*, con 5 neuronas establecidas por medio de la “regla de la capa oculta-capas de entrada”, en la que la cantidad de neuronas no debe exceder el doble del número de entradas [5], ver figura 2. Las funciones de transferencia usadas en el entrenamiento son sigmoideas tangenciales y logarítmicas (2).

$$y(p) = \frac{1}{1 + e^{-p}} \quad (2)$$

La anterior ecuación (2) describe de forma general la salida de los nodos de la capa oculta y de salida, la cual está en función de p , esta es la sumatoria del producto entre las entradas y los pesos de conexión (3).

$$p = \sum_{i=1}^n x_i * w_i$$

Con esta configuración se observa, en la figura 3, (3) el aprendizaje del algoritmo alcanzando un rendimiento óptimo en el lapso 34 aproximadamente, esto significa la cantidad de veces que el algoritmo iterativo necesitó para reducir el error asociado, modificando y adaptando los pesos con la capa de salida.

(1)

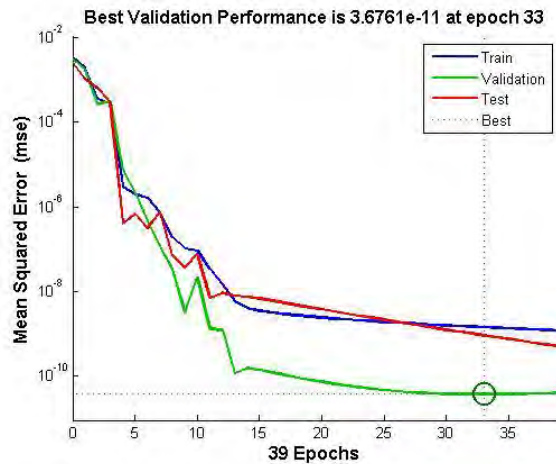


Figura 3. Rendimiento de la red neuronal (MSE)

Con la red entrenada, se realiza una prueba de predicción variando la información inicial con el fin de verificar la exactitud del algoritmo. En la figura 4 se puede observar que el algoritmo presenta una respuesta muy aproximada a la real, presentando, en general, un error del 9,14% en los datos de consumo arrojados por el algoritmo.

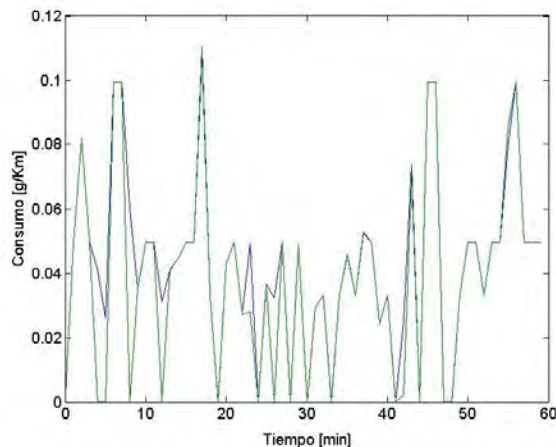


Figura 4. Comparación de datos reales (verde) vs respuesta de la red neuronal (azul).

En la tabla 4 se presenta un segmento de los datos de la anterior gráfica, en la que se observan más detalladamente las diferencias en el consumo de combustible en situación real frente a la predicción generada por la red neuronal.

Tiempo	Arranques [Veces]	Vel. Promedio [m/s]	Dist. Recorrida [m]	Consumo real [g/km]	Consumo Red Neuronal [g/km]
0	0	0	0	0	3,82727E-06
1	2	6,94	416,4	0,049677	0,049664185
2	1	11,45	687	0,081959	0,081826519
3	2	6,94	416,4	0,049677	0,049664185
4	0	5,74	344,4	0,041087	2,96946E-05
5	0	3,65	219	0,026127	1,05509E-05
6	1	13,88	832,8	0,099353	0,099361555
7	1	13,88	832,8	0,099353	0,099361555
8	0	8,42	505,2	0,06027	0,000160939
9	3	4,956	297,36	0,035475	0,035475383
10	2	6,94	416,4	0,049677	0,049664185
11	2	6,94	416,4	0,049677	0,049664185
12	0	4,35	261	0,031137	1,44332E-05
13	2	5,72	343,2	0,040944	0,041033028
14	2	6,23	373,8	0,044594	0,044603515
15	2	6,94	416,4	0,049677	0,049664185

Tabla 4. Segmento de 15 datos de consumo de una situación real comparado con el generado por la red neuronal.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se realizó un algoritmo de consumo energético ante variaciones de tráfico vehicular, permitiendo predecir el consumo energético de los vehículos urbanos de la ciudad de Bogotá. El tramo y el horario seleccionado permiten realizar suposiciones futuras en ambientes de tráfico medio, lo cual reflejaría desplazamiento en horas valle.

En la ejecución de la red neuronal se presentó un error general de predicción del 9,14%, en un recorrido de sesenta segundos, por lo que su efectividad es bastante alta. El uso de este tipo de algoritmos por parte de las empresas que administran los buses de transporte urbanos podrían mejorar los horarios de salida de sus vehículos, optimizar rutas, planear mantenimientos y mejorar los costos en combustible.

4. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación es apoyada financieramente por la Vicerrectoría de investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada, mediante el ING 1535, desarrollado al interior del grupo de investigación GAV del programa de ingeniería Mecatrónica.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] X. Zhou, J. Huang, W. Lv y D. Li, «Fuel Consumption Estimates Based on Driving Pattern Recognition,» *IEEE International Conference on Green Computing and Communications and IEEE*

Internet of Things and IEEE Cyber., pp. 496, 503, 20-23, 2013.

- [2] G. Brettia, R. Natalini y B. Piccoli, «Numerical algorithms for simulations of a traffic model on road networks,» *Journal of Computational and Applied Mathematics*, n° 210, pp. 71-77, 2007.
- [3] D. Yu, X. Yin, L. Du y J. Xie, «Simulation Research on Dynamic Traffic Assignment Model,» *Intelligent Computation Technology and Automation*, vol. 2, pp. 240,243, 2009.
- [4] P. Kumar, R. Merzouki, B. Conrard, V. Coelen y B. Bouamama, «Multilevel Modeling of the Traffic Dynamic,» *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, pp. 1066,1082, 2014.
- [5] R. F. López y J. M. Fernández F., *Las Redes Neuronales Artificiales*, España: Netbiblo, 2008.
- [6] M. Romero, et all, *Contaminacion atmosferica, asma bronquial e infecciones respiratoria agudas en menores de edad*, de La Habana, *Salud publica de mexico* Vol. 46 no. 3, 2004.
- [7] C. Herrera, *El consumo de combustible en Bogota, una aproximacion macroeconomica*, Raddar, 2009.
- [8] J. Posada, C. Gonzalez, *consumo de combustible en vehículos*, Ingenierias, 2013.

PROCESO DE DESARROLLO DE ENCERRAMIENTOS ORIENTADO A MEJORAR EL DESEMPEÑO ELECTROMAGNÉTICO DE LOS PRODUCTOS ELECTRÓNICOS

Development enclosures process oriented to improve the electromagnetic performance of electronics products

RESUMEN

La compatibilidad electromagnética de un producto electrónico es clave para que este funcione correctamente en su ambiente de trabajo y, generalmente, es un requisito para incurrir en mercados extranjeros. Este artículo presenta un proceso para el desarrollo de encerramientos orientado a mejorar el desempeño electromagnético del equipo, buscando a su vez una correcta integración entre el encerramiento y los demás componentes del producto. El proceso se ajusta a las necesidades del sector electrónico de Bogotá y, por tanto, su implementación requerirá una inversión mínima en tiempo y costo.

Palabras clave: Compatibilidad Electromagnética-CEM, diseño de encerramientos, efectividad de blindaje, parámetros de diseño, requerimientos del producto

ANDRE LAVERDE

Ingeniero electrónico, M. Sc.
Ingeniero investigador
CIDEI
pcb@cidei.net

VIVIANA ABADÍA

Ingeniera industrial
Joven investigador
CIDEI
vabadia@cidei.net

ABSTRACT

The electromagnetic compatibility of an electronic product is the key to make it work properly in its work environment and It is generally a requirement to engage in foreign markets. This paper presents a process for the enclosures development to improve the device electromagnetic performance, looking for, at the same time, a correct integration between the enclosure and the other components of the product. The process meets the needs of the electronics industry in Bogota and therefore, its implementation will require a minimum investment in time and cost.

Keywords: Electromagnetic compatibility-EMC, enclosure design, integration, parameters design, product requirements, Shielding effectivity.

1. INTRODUCCIÓN

Los productos electrónicos deben funcionar sin afectar otros productos en su ambiente de trabajo ni verse afectados ellos mismos por causa de la presencia de perturbaciones electromagnéticas, esto es lo que se conoce como compatibilidad electromagnética- CEM. El nivel de compatibilidad electromagnética de un producto depende de factores tanto internos como externos al mismo, por ejemplo: el ambiente de trabajo, el diseño electrónico, el sistema de puesta a tierra, la frecuencia, el voltaje, el apantallamiento de sus cables y, especialmente, el encerramiento [1].

El encerramiento, caja o *enclosure* que lo protege es uno de los aspectos más críticos del producto en cuanto al cumplimiento de estándares de CEM; debido a que el encerramiento contribuye a reducir las emisiones de ruido generadas en el interior del producto – emisión y, a su vez, protege a los componentes internos de las perturbaciones electromagnéticas presente en el ambiente exterior - inmunidad. De esta manera el encerramiento influye tanto en el nivel de emisión como en el de inmunidad electromagnética de un producto electrónico [2].

En el presente artículo se presenta un proceso para el desarrollo de encerramientos de productos electrónicos integrado en el proceso general de desarrollo de productos electrónicos y orientado al cumplimiento de estándares de compatibilidad electromagnética. El proceso propuesto es el resultado de la experiencia en el desarrollo de encerramientos del CIDEI (Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Industria Electro-electrónica y Tics) y de un proceso de análisis e investigación sobre técnicas de diseño de encerramientos orientadas al cumplimiento de estándares de CEM.

Esta propuesta se construyó especialmente para las empresas del sector electrónico de Bogotá región; tanto para aquellas que desean exportar, como para las que necesitan mejorar el desempeño electromagnético de su producto o generar valor agregado para sus clientes. Por tanto el proceso sugerido se ajusta a las necesidades de las empresas del sector y no necesita de una gran inversión en tiempo o costo.

2. PROCESO DE DESARROLLO DE ENCERRAMIENTOS CON CEM

En este capítulo se desglosará, paso a paso, el proceso propuesto; el proceso contempla acciones encaminadas a

mejorar el nivel de compatibilidad electromagnética del producto a lo largo de cada una de las fases del proceso general de desarrollo. Además, integra totalmente el proceso de desarrollo del encerramiento en el proceso general de desarrollo del producto, con el fin de evitar reprocesos, sobreesfuerzos y/o desperdicios durante el desarrollo.

2.1 Metodología

Para llevar a cabo la investigación asociada al presente artículo, se diseñó e implementó la metodología que muestra la figura 1:

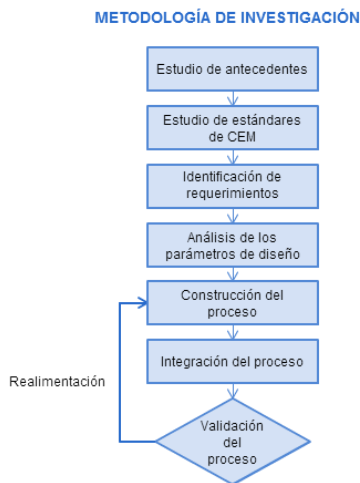


Figura 1. Metodología de investigación

Esta metodología puede ser implementada para la construcción del proceso de desarrollo de cada una de las áreas de diseño de ingeniería – diseño electrónico, diseño mecánico y diseño de *software*, orientando cada proceso al cumplimiento de estándares de compatibilidad electromagnética de un producto electrónico.

2.2 Antecedentes

Se han desarrollado algunas propuestas para mejorar el desempeño electromagnético de un producto, (Maree & Reader, 1999) presentan una propuesta para incluir la CEM en un producto considerando todo el ciclo de vida del mismo. El proceso propone actividades relacionadas a la compatibilidad electromagnética con su respectiva documentación asociada [3]. Por otra parte, (Moore, 2003) presenta una propuesta para la implementación y gestión de un plan de mitigación del nivel de CEM de un producto, el plan busca disminuir el riesgo de incompatibilidad de un producto a través de la búsqueda de soluciones efectivas y al menor costo posible [4].

Específicamente para el diseño del encerramiento, Edrisi, Chan, & Nafalski (2000) estudian la metodología de desacoplamiento modular -MDM, la cual busca predecir a través de la simulación computacional la efectividad de blindaje de un encerramiento, teniendo en cuenta los componentes electroelectrónicos que debe encerrar. Este método permite ahorrar costos, prediciendo interferencias electromagnéticas en etapas tempranas del desarrollo. No obstante, el método se centra principalmente en el diseño del encerramiento, sin abarcar el proceso completo de desarrollo del producto [5].

Dado lo anterior, se puede afirmar que ninguna de las propuestas estudiadas presenta consideraciones acerca de la integración entre el encerramiento y las áreas de diseño de ingeniería durante el proceso general de desarrollo del producto, lo cual es un valor agregado de la presente propuesta.

2.3 Proceso propuesto

El proceso propuesto se basa en el modelo conceptual que muestra la figura 2:



Figura 2. Modelo Conceptual desarrollo de producto enfocado en CEM.

Primero, se debe identificar de acuerdo al mercado objetivo del producto, la regulación en cuanto a compatibilidad electromagnética exigida por este mercado. Después de esto, se debe identificar dentro de

la regulación exigida cuáles son los estándares específicos que aplican al producto y en estos estándares se debe encontrar cuáles son los límites de emisión y los límites de inmunidad que el equipo debe cumplir, para

identificar estos límites es necesario definir con claridad la clase de producto a la cual pertenece el equipo a desarrollar y el tipo de ambiente de trabajo en el cual se desempeñará. La norma IEC 61000-1-1 define los conceptos y nociones básicas para determinar el nivel de compatibilidad que requiere un producto [6].

Para identificar la clase de producto a desarrollar, se sugiere consultar la norma IEC 61000-3-2, la cual define la clasificación de equipos bajo prueba y los límites para las emisiones de equipos eléctricos y electrónicos [7]; por otra parte, para identificar el tipo de ambiente de trabajo, se puede revisar la norma IEC 61000-2-5, la cual define la clasificación para los ambientes electromagnéticos, iniciando en la categoría 1 para un ambiente residencial en donde los límites de inmunidad son menores y terminando en la categoría 8 para el ambiente de un hospital, donde los límites de inmunidad tienen una mayor exigencia, de acuerdo al ambiente, a la frecuencia y a la potencia del equipo se establecen los límites de inmunidad [8].

Luego, a partir de los límites de compatibilidad que debe cumplir el producto, se empiezan a analizar y estimar parámetros de diseño que debe cumplir el producto para ser compatible electromagnéticamente en su ambiente de trabajo. Es importante resaltar que se debe agregar un porcentaje de error a los límites exigidos por las normas, es decir, se debe diseñar para alcanzar un nivel de compatibilidad mayor al exigido por la norma con el fin de reducir el riesgo de no conformidad durante las pruebas de certificación [6]. Seguidamente de establecer los parámetros, todo el proceso de diseño del producto se debe enfocar en el cumplimiento de los mismos y se deben ejecutar actividades para la verificación y validación del nivel de compatibilidad electromagnética requerido para el producto.

Para establecer los parámetros de diseño del encerramiento que permitan cumplir con el nivel de compatibilidad requerido, se debe determinar la efectividad de blindaje que debe ofrecer el encerramiento, a partir de los límites tanto de emisión como de inmunidad exigidos para el producto. Un encerramiento cumple su función de blindaje a través de tres mecanismos físicos: absorción, reflexión y re reflexión de las ondas electromagnéticas, dependiendo de la efectividad de estos tres mecanismos se estima una efectividad de blindaje total del encerramiento, comúnmente una efectividad de blindaje de 40 dB es adecuada para las necesidades de blindaje de un producto electrónico promedio [9].

Los principales parámetros de diseño que influyen en la efectividad de blindaje del encerramiento son [10]:

- Tamaño, forma y número de aberturas
- Grosor del material
- Conductividad y permeabilidad del material
- Mecanismos para el ensamble o sujeción

Estos parámetros dependen, a su vez, de otros factores como : tamaño y número de componentes del equipo, condiciones de usabilidad del producto, estética e imagen que se quiere proyectar, entre otros; por esto, para diseñar el encerramiento se deben considerar factores técnicos, estéticos y de uso que permitan encontrar una solución integral ajustada a las necesidades del producto, del usuario y de la empresa.

2.3.1 Técnicas para el análisis y estimación de los parámetros de diseño del encerramiento

A continuación se presentan técnicas para el análisis y estimación de parámetros de diseño del encerramiento, teniendo en cuenta la efectividad de blindaje:

Material: para escoger el material que brinde la efectividad de blindaje requerida, se tienen en cuenta las propiedades de permeabilidad relativa y conductividad relativa del mismo. Existen ecuaciones que relacionan la efectividad de blindaje con estas propiedades del material; recordando que el material cumple su función de blindaje a través de los mecanismos de absorción, reflexión y rereflexión, se debe sumar el blindaje que brinda el material mediante cada uno de estos mecanismos para determinar el blindaje total brindado por el material en estudio[11].

Este blindaje también varía de acuerdo a la frecuencia de las perturbaciones a las que estará expuesto el producto, por lo tanto se buscarán materiales con unas u otras propiedades dependiendo de la frecuencia a la que se desee blindar, el encerramiento metálico generalmente brinda mayor protección, sin embargo el encerramiento plástico presenta mayor flexibilidad en la geometría, mejores acabados y menores costos de fabricación [12].

Es importante resaltar que la efectividad de blindaje no es la única prestación que se busca en el material del encerramiento, también se consideran propiedades como: resistencia al impacto, resistencia a la temperatura, peso, impermeabilidad, textura, costo, forma geométrica, procesos de fabricación disponibles, entre otros aspectos.

Teniendo en cuenta los múltiples criterios que influyen en el proceso de selección de un material, se han desarrollado varias técnicas que permiten seleccionar el material que satisfaga de mejor manera los requerimientos del producto. Entre las técnicas más comunes se encuentran: el proceso de jerarquía analítica [13], el proceso de la red analítica [14] y el método de lógica digital, este último tiene dos modificaciones: una es conocida como método de detección del límite-MDL y la otra es el Método de la transformación Z [15].

Aunque todas las técnicas mencionadas permiten la valoración multicriterio, el método que incorpora menos subjetividad en el proceso de selección es el método de la transformación Z, este método se ha aplicado

específicamente para mejorar el blindaje del encerramiento en la industria aeronáutica y consiste en establecer un peso para cada criterio y luego valorar a partir del empleo de ecuaciones a cada alternativa en una escala de cero a cien; de esta manera se selecciona la alternativa con la mejor calificación ponderada [15]. Para el diseño del encerramiento se puede contemplar más de un material, no obstante es aconsejable seleccionar solo uno, máximo dos, con el fin de reducir el número de procesos de fabricación por los que debe pasar el encerramiento, reduciendo costos y defectos a causa del proceso de fabricación.

Aberturas: la efectividad de blindaje es inversamente proporcional al tamaño de la abertura. Generalmente un encerramiento no tiene una sino múltiples aberturas, en este caso la reducción de blindaje es aproximadamente proporcional a la raíz cuadrada del número total de aberturas de igual tamaño [16]. Teniendo en cuenta lo anterior, se propone a partir de la efectividad de blindaje requerida y la frecuencia de las perturbaciones a las cuales el producto estará expuesto, estimar un tamaño máximo para las aberturas, por ejemplo, para frecuencias mayores a 1 Ghz y alcanzando un blindaje de 20 dB, el tamaño máximo de las aberturas será de 1.6 cm[2].

En cuanto a las aberturas, no solo se debe analizar el tamaño, también se debe considerar la orientación de la abertura en relación al bucle de corriente que se genera al interior del encerramiento, se recomienda que la abertura sea paralela a la dirección del bucle de corriente en el interior [9].

Grosor del material: el grosor del material también influye en la efectividad de blindaje del encerramiento. Para estimar el grosor adecuado se debe tener en cuenta la frecuencia de las perturbaciones a las que estará expuesto el equipo, así como las propiedades de conductividad y permeabilidad del material; normalmente el grosor del aluminio para frecuencias de 30MHz es de 0,015 mm [2].

Técnicas de ensamble y sujeción: el encerramiento usualmente se compone por dos o más piezas unidas por algún mecanismo de ensamble o sujeción, la eficacia de blindaje se reduce por medio de estas uniones, casi tanto como ocurre por las aberturas. Por esto se debe buscar el menor escape de aire posible entre las uniones o ensambles y asegurarse de que el material empleado para el ensamble tenga igual conductividad que el material del encerramiento [9].

2.4 Integración del proceso de desarrollo del encerramiento en el proceso general de desarrollo de producto

Para integrar el proceso de desarrollo del encerramiento al proceso general de desarrollo de producto se seleccionó la metodología de desarrollo de producto

conocida como *Rational Unified Process* -RUP, ya que es la evolución de varias metodologías y ha sido la metodología implementada por el CIDEI en la ejecución de sus proyectos de desarrollo. Esta metodología consta de cuatro fases: inicio, elaboración, construcción y transición [17]. Para cada fase se describirán los aspectos críticos de la integración entre el encerramiento y los demás componentes del producto, lo cual es necesario para cumplir de manera efectiva los requerimientos de compatibilidad electromagnética.

2.4.1 Fase de inicio

En esta fase el esfuerzo se centra principalmente en la planeación del proyecto de desarrollo y en la definición de los requerimientos del producto. Para definir requerimientos asociados a la compatibilidad electromagnética se propone establecer restricciones y parámetros de diseño a partir de los límites de compatibilidad que debe cumplir el producto para satisfacer los estándares. En el caso del encerramiento, estas restricciones se definen mediante las ecuaciones asociadas a la efectividad de blindaje.

Los entregables de las actividades ejecutadas durante esta fase alimentarán directamente el proceso de desarrollo del encerramiento de la siguiente manera:

- Alcance del proyecto: es una entrada para definir los requerimientos de diseño del encerramiento.
- Descripción de *stakeholders* o involucrados: es una entrada para definir la secuencia de uso del producto.
- Línea base del cronograma y el presupuesto: establece el costo máximo que puede alcanzar el desarrollo y la fabricación del encerramiento.
- Requerimientos del producto: establece restricciones y parámetros para el diseño del encerramiento.

En esta fase se integra una actividad del proceso de desarrollo del encerramiento conocida como análisis de referentes morfológicos, con el fin de identificar en el mercado referentes para el encerramiento, a partir de la propuesta conceptual del nuevo producto [18].

2.4.2 Fase de elaboración

Durante esta fase es necesario una comunicación constante entre las áreas de diseño del producto con el fin de evitar reprocesos y ejecutar los cambios al diseño necesarios en el momento oportuno. Para desarrollar el encerramiento se requiere recibir información oportuna sobre los demás componentes del producto, entre la información requerida se tiene:

- hojas de datos de los componentes
- Medidas y diagramas de cada diseño de ingeniería
- Requerimientos de ubicación de componentes
- Requerimientos de puesta a tierra asociados al encerramiento

A su vez, desde el área de diseño del encerramiento se debe enviar información sobre recomendaciones y restricciones que las demás áreas de diseño de ingeniería del producto deben tener en cuenta, sugerencias y restricciones como:

- Tamaños máximos para las aberturas
- Sugerencias para la ubicación de componentes
- Métodos de ensamble y sujeción de componentes
- Sistemas de comunicación con el usuario
- Salida para el cableado

Adicionalmente, para una correcta integración entre los componentes del producto y el encerramiento se sugiere ejecutar simulaciones que permitan estimar el nivel de campo electromagnético emitido por el producto, con el fin de definir el nivel de atenuación que debe brindar el encerramiento e identificar zonas críticas de ruido susceptibles de requerir un blindaje especial. Para esto existen herramientas de modelado 3D como el aplicativo MWS CST, el cual tiene incorporado un modelo totalmente parametrizado, que permite simular la emisión del PCB y los cables de un equipo [18]. En el caso de no tener los recursos para acceder a este tipo de herramientas, se puede hacer uso de *softwares* libres disponibles en el mercado, uno de los más útiles en este campo se conoce como Eduin XP.

Durante esta fase es importante realizar validaciones al diseño del encerramiento, verificando que esté orientado al cumplimiento de los requerimientos del producto y se integre correctamente con los demás diseños. Estas validaciones se pueden llevar a cabo a través del modelado y del uso de *software* de simulación. En los cuales se pueden ejecutar pruebas como [19]:

- Análisis estático
- Resistencia al impacto
- Análisis de interferencias
- Prueba de hermeticidad
- Calibración de espesores
- Efectividad de blindaje

Para validar la efectividad de blindaje del encerramiento, existen aplicativos de *software* que emplean métodos estandarizados de simulación, por ejemplo *Antenna Design Framework Electromagnetic Satellite* (ADF-EMS) es una aplicación comercial que permite simular la efectividad de blindaje de un encerramiento a través de la caracterización del ruido electromagnético del ambiente en el que se ubicará el equipo, la caracterización de los componentes internos del equipo, y los parámetros de diseño del encerramiento [21].

También existen métodos estocásticos como la simulación Monte Carlo para calcular la efectividad de blindaje. En este caso se simula la magnitud del campo eléctrico a diferentes frecuencias variando el tamaño de las aberturas [22]. Algunas características que se deben tener en cuenta para seleccionar un *software* de

simulación son: capacidad, costo y flexibilidad de la prueba [22].

2.4.3 Fase de construcción

En esta fase se implementan los diseños verificados durante la fase de elaboración. El diseño del encerramiento se materializa a través del prototipado 3D y luego se fabrica la cabeza de serie, esta puede sufrir modificaciones debido al proceso de fabricación, el cual generalmente tiene limitaciones asociadas a formas, medidas o métodos de sujeción. Por esta razón, dependiendo del proceso de fabricación, se deben considerar durante el diseño restricciones como: espesores de lámina, ángulos de salida, radios y relieves, además de imperfecciones comunes generadas durante los procesos o subprocesos de fabricación [24].

En el caso de Bogotá, Cundinamarca, se puede acceder principalmente a los procesos de: termoformado, chapa metálica, rotomoldeo e inyección, aunque los procesos de rotomoldeo e inyección se ajustan mejor a grandes producciones y, por tanto, no son rentables para las empresas del sector electrónico de esta región, las cuales requieren lotes pequeños de producción.

Una vez se fabrique cada diseño, se realizan pruebas para la validación del mismo. Para validar la efectividad de blindaje del encerramiento se pueden ejecutar pruebas de laboratorio; las pruebas se pueden realizar con o sin los componentes internos; los equipos más usados en estas pruebas son: analizador de espectros, cámara anecoica, fuente controlada y analizador de redes, entre otros. Si el producto presenta fallas en cuanto a CEM en esta etapa, se deben proponer acciones correctivas que lleven a alcanzar los límites de emisión e inmunidad requeridos, estas acciones pueden incluir el uso de filtros, refuerzos en el blindaje a través de pinturas especiales, o blindajes específicos para áreas críticas emisoras de ruido, dentro de estas opciones se seleccionará la más efectiva para cumplir con el nivel de CEM requerido [25].

2.4.4 Fase de transición

En esta fase se sugiere hacer pruebas de usabilidad en el ambiente de trabajo del producto, para encontrar oportunidades de mejora de la relación usuario- producto o usuario-contexto. Adicionalmente, como en esta fase se fabrica la preserie del producto, es importante identificar tolerancias que maneja el proceso de fabricación y adaptar el diseño de forma tal que los productos cumplan con los estándares requeridos a pesar de estas tolerancias.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para que un producto cumpla efectivamente los niveles de compatibilidad electromagnética exigidos por los estándares, es necesario orientar e integrar todas las áreas

que intervienen en el desarrollo del producto hacia el cumplimiento de estos estándares. Para esto se requiere diseñar cada uno de los componentes del producto a partir de restricciones de diseño que permitan cumplir con estos niveles. En el caso del encerramiento, todo el diseño se debe enfocar hacia el logro de la efectividad de blindaje requerida para cumplir con los estándares de CEM.

En este artículo, se presentó una propuesta para la integración del diseño de encerramientos con CEM al proceso general de desarrollo de producto, evidenciando que estos procesos pueden ser integrados y complementados, mejorando así la eficiencia del desarrollo de producto. Se espera que con la implementación de este proceso las empresas del sector electrónico de Bogotá región puedan mejorar el desempeño electromagnético de sus productos, añadir valor agregado para sus clientes y llevar sus productos a mercados extranjeros que exigen estándares de compatibilidad electromagnética.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. L. Mesa Ledesma, Nociones teóricas de compatibilidad electromagnética, Sevilla: Design Science License, 2000.
- [2] W. Boyes, «Chapter 45 EMC,» de *Instrumentation Reference Book*, Burlington, USA, ElSevier, 2009.
- [3] J. B. Maree y H. C. Reader, «the product/system development life cycle an EMC approach,» *EMC York, Conference publication IEEE*, n° 464, pp. 151 - 156, 1999.
- [4] G. Moore, «Development, Implementation and management of a system level EMC Design Mitigation Plan,» *IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 173 - 176, 2003.
- [5] M. Edrisi, W. K. Chan y A. Nafalski, «An extension of modular decoupling methodology for EMC to enclosure with aperture and some contents,» *International journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, IOS Press, pp. 211-217, 2000.
- [6] T. I. E. C. (IEC), *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 1. Generalidades*, Bogotá: ICONTEC (Instituto colombiano de normas técnicas y certificación) ACIEM, 2000.
- [7] K. N. Sakthivel, S. K. Das y K. R. Kini, «Importance of Quality AC Power Distribution and Understanding of EMC Standards IEC 61000-3-2, IEC 61000-3-3 & IEC 61000-3-1 1,» *8th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility*, pp. 423 - 430, 2003.
- [8] B. W. Jaekel, «Description and classification of electromagnetic,» *Electromagnetic Compatibility, IEEE International Symposium*, n° 10288301, pp. 1-4, 2008.
- [9] T. Williams, «Chapter 14 Shielding,» de *EMC for product Designers*, Oxford, ElSevier, 2007, pp. 381-402.
- [10] K.-Y. Park, S. E. lee, C. G. Kim y J. H. Han, «Application of MWNT added glass fabric/epoxy composites to electromagnetic wave shielding enclosures,» *Composite Structures Science Direct, ElSevier*, n° 81, pp. 401-406, 2007.
- [11] H. Guan, S. Liu, Y. Duan y J. Cheng, «Cement based electromagnetic shielding and,» *Cement & Concrete Composites*, n° 28, p. 468-474, 2006.
- [12] D. Markham, «Shielding: Quantifying the shielding requirements for portable electronic design and providing new solutions by using a combination of materials and design,» *Materials and Design, ElSevier*, n° 21, pp. 45-50, 2000.
- [13] E. H. Forman y S. I. Gass, «The Analytic Hierarchy Process - An exposition,» *Operations Research*, vol. 49, n° 4, pp. 469-486, 2001.
- [14] A. S. Milani, A. Shaniyan, C. Lynam y T. Scar, «An application of the analytic network process in multiple criteria material selection,» *Materials and Design ElSevier*, n° 44, pp. 622-632, 2013.
- [15] K. Fayazbakhsh y A. Abedian, «Materials selection for electronic enclosures in space environment considering electromagnetic interference effect,» *Advances in Space Research*, n° 49, pp. 586-593, 2012.
- [16] D. K. K. Jha, «Spectrum management and EMC Design Techniques of Electronics System,» *ElectroMagnetic Interference and Compatibility (INCEMIC), Proceedings of the 9th International Conference*, n° 11153518, pp. 7-10, 2006.
- [17] P. Kruchten, *The Rational Unified Process: An Introduction.*, Addison-Wesley Professional, 2004.
- [18] J. C. Briede Westermeyer y A. Rebolledo Arellano, «Modelo visual para el mapeo y análisis de referentes morfológicos,» *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 21, n° 2, pp. 185-195, 2013.
- [19] M. . v. Doorn, «EMC Design Guidelines for Electrical Architectures,» *Proceeding of the International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 20-23, 2013.
- [20] R. Singh, . A. Mattoo y A. Saigal, «Optimizing the design and impact behavior of a polymeric enclosure,» *Materials and Design*, n° 27, pp. 955-967, 2006.
- [21] M. Bandinelli, G. Galgani, G. Guida, V. Martorelli y A. Sarri, «Experimental validation of an Oct Based modelling tool integrated into an electromagnetic simulator framework,» *Aerospace EMC, 2012 Proceedings ESA Workshop, IEEE*, n° 12852570, pp. 1-5, 2012.

- [22] S. Lalléchère, S. Girard, P. Bonnet y F. Paladian, «Enforcing Experimentally Stochastic Techniques in uncertain electromagnetics environments,» *Aerospace EMC, Proceedings ESA Workshop IEEE*, nº 12852561, pp. 1-6, 2012.
- [23] P. Webb , «Cost and Quality Improvement of Automating,» *international Symposium of Electromagnetic Compatibility, IEEE*, vol. 1, pp. 178-181, 2004.
- [24] J. Lesko, Diseño Industrial Guía de materiales y procesos de manufactura, Balderas Mexico D.F: Limusa Wiley, 2010.
- [25] Pucará Red de Certificación y calificación de componentes y sistemas microelectrónicos, Guía de compatibilidad electromagnética, Programa de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, 2008.

METODOLOGÍA DE DISEÑO INTEGRADO PARA TAPADORA LINEAL EN UN PROCESO DE EMBOTELLADO

Integrated Design Methodology for a Linear Capping Bottling Process

RESUMEN

Este artículo presenta el diseño de un prototipo CAD de una tapadora lineal en un proceso de embotellado, integrando el modelo en V y la metodología Triz. El prototipo se diseña con base en requerimientos de la embotelladora ubicada en la Universidad Autónoma de Colombia. El diseño contempla resultados de aspectos estructurales y de control del prototipo. Se presenta la metodología empleada y su desarrollo. Se muestran los resultados del prototipo CAD integrando herramientas de *Solidworks* y *Labview*. La metodología de diseño integrado se propone como una opción para la prueba de aceptación o prueba FAT de diseño.

Palabras clave: diseño concurrente, diseño integrado, metodología Triz, Modelo en V, Prueba FAT.

ABSTRACT

This paper presents the design of a prototype CAD in a linear capper bottling process, integrating the V- model and Triz methodology. The prototype is designed based on requirements of the bottler located in the Autonomía de Colombia University. The design includes both structural aspects and control results of prototype. The methodology and its development is presented. The results of the prototype integrating CAD Solidworks and Labview tools. The integrated design methodology is proposed as an option for the factory acceptance test or FAT test.

Keywords: Concurrent Design, Integrated Design, Triz Methodology, Test FAT-Test, V-Model.

1. INTRODUCCIÓN

En el laboratorio de la Fundación Universidad Autónoma de Colombia (FUAC), se desea diseñar una tapadora de botellas para continuar una línea de embotellado que se encuentra en el laboratorio de instrumentación y control de procesos. El proceso previo a este diseño fue la adquisición de una llenadora de contenedores botellas, la cual se encuentra acoplada mecánicamente a una banda transportadora.

Para el diseño de la tapadora se parte de restricciones de espacio, velocidad de la banda transportadora, entre otras restricciones y se quiere realizar una prueba de aceptación para fabricación o prueba FAT, para construir el prototipo de la máquina tapadora.

En este trabajo se presenta una metodología que integra metodología de diseño e inventiva para el diseño de la tapadora, integrando también *software* de diseño y control para mostrar viabilidad de la prueba FAT.

Este artículo se divide en cuatro secciones, en la primera sección se presenta una breve revisión de tapadoras de botellas, en la segunda sección se trata sobre el proceso

ALONSO DE JESÚS CHICA LEAL

Ingeniero electrónico, M. Sc.
Docente-Investigador
Universidad Autónoma de Colombia
alonso.chica@fuac.edu.co

ÉDISON EFRÉN ORJUELA HERNÁNDEZ

Ingeniero Electromecánico
Universidad Autónoma de Colombia
edison.orjuela@hotmail.com

ÉDWAR GEOVANNY RODRÍGUEZ SALCEDO

Ingeniero Electromecánico
Universidad Autónoma de Colombia
edwardrodriguezs@hotmai.com

de diseño y la metodología de diseño integrado con el desarrollo para un prototipo de máquina tapadora lineal para la Universidad Autónoma de Colombia, en la tercera sección se muestra la etapa de diseño conceptual de la máquina y las pruebas en CAD, en la cuarta sección se muestran algunos cálculos de la máquina y en la quinta sección se muestra la integración de *software* para la validación del prototipo y los resultados obtenidos del prototipo en CAD y las pruebas FAT del diseño. Al final se presentan algunas conclusiones y una bibliografía con referencias utilizadas.

2. CONTENIDO

2.1 Máquinas tapadoras de botellas

En general, un sistema de tapado puede ser rotativo o lineal. Las tapadoras tienen dos grandes unidades, clasificación de las tapas y apriete de la tapa. Una tapadora de botella semiautomática requiere que la tapa sea colocada en la botella antes de entrar en el módulo de tapado, esto eliminará el uso de una tolva; y una tapadora totalmente automática almacenará, seleccionará y colocará la tapa en la botella de forma automática. En comparación, una tapadora de tipo rotativo puede tener

un costo de hasta diez veces más que una de tipo lineal; como ventaja a favor de la de tipo lineal, se evidencia que suelen tener menores costos para las piezas de cambio adicionales necesarios para ejecutar los diferentes tamaños de los envases y tapas; otra ventaja muy marcada para escoger el tipo de tapadora para el laboratorio es que las tapadoras de tipo lineal suelen ubicarse sobre la línea de embotellado, en la banda transportadora, sin que se tenga que modificar la banda transportadora. Las tapadoras rotativas alcanzan velocidades de tapado en una relación de 1:15 con respecto a las tapadoras lineales, aunque para el presente trabajo la línea de producción es de tipo didáctico y no de alta productividad, para lo cual una tapadora lineal es suficiente para las restricciones de velocidad de tapado.

Otro elemento importante a tener en cuenta, para la selección de la tapadora, es el espacio con el que se cuenta en el laboratorio, las tapadoras de tipo rotativo suelen ser de grandes dimensiones en comparación a las de tipo lineal, pues pueden llegar a ser 3 o 4 veces más grande.

Dentro de la búsqueda de antecedentes relacionados con proyectos de diseño de tapadoras lineales con método de diseño concurrente, no se encontraron referencias, aunque no se debe descartar que sea un método usado por alguno o varios de los fabricantes de este tipo de máquinas, sin que sea revelado. Esto es un plus para el desarrollo del trabajo.

Si se refiere a la adaptabilidad, los formatos diferentes de botellas se deben configurar para ajustar la máquina. Considerar esto significa disminuir los tiempos de parada, para que el operario haga unos ajustes en los anchos de las bandas. En la literatura no se presentan detalles de esta adaptabilidad para máquinas tapadoras de pequeño volumen. Se encuentran diferentes sistemas adaptables en la literatura y en patentes.

2.2 Proceso de diseño

Actualmente existen diversos modelos para el desarrollo de sistemas en ingeniería, entre los más conocidos se encuentran el modelo en cascada, el modelo en espiral y el modelo en V [1]; y cuando se desea trabajar sobre metodologías para la innovación de un producto, se pueden encontrar entre otras la metodología Triz, que es un acrónimo ruso de *Teoriya Resheniya Izobretatelskikh Zadatch*, que en español significa: Teoría de Resolución de Problemas de Inventiva. Esta metodología es, a su vez, un sistema de herramientas, una base de conocimiento y una tecnología basada en modelos para generar ideas y generar soluciones innovadoras de problemas [2].

El ciclo de vida del proyecto de diseño de este trabajo sigue un proceso del desarrollo concurrente con modelo en V. Es concurrente debido a que se trabajó en paralelo el diseño mecánico y el diseño del sistema de control y automatización de la tapadora; además, se utiliza la

metodología en V, ya que se aplica para obtener un prototipo y se realizan pruebas del diseño para cada fase de diseño, con unas actividades de pruebas y seguimientos de errores de diseño.

Se diseña una tapadora lineal con características de funcionamiento de una tapadora comercial de la empresa Lazar Technologies¹, pero con mejoras importantes con las que no se cuentan en este tipo de máquinas como adaptabilidad con motores servos, ajuste automático con la inserción de sensores, control y operación desde un sistema por computador.

2.3 Conceptos de diseño

Dentro de los subconjuntos principales proyectados para el sistema de tapado, se encuentran tres importantes que son el subsistema de almacenamiento y suministro de tapas, el subsistema de estabilidad de botellas y el subsistema de roscado de las tapas. Estos conceptos de diseño para estos sistemas comenzaron con un boceto a mano alzada y luego fueron elaborados en el *software Solidworks*, para realizar las pruebas conforme lo estipula el método en V. Para cada uno de los diseños de estos subsistemas se empleó la metodología Triz, revisando los principios de invención en patentes de todo el mundo y realizando la matriz de contradicción. La figura 1 muestra un boceto con el concepto inicial de los componentes estimados para el prototipo de máquina tapadora lineal y es el concepto global de la máquina, ajustado a la banda transportadora. Las botellas ingresan por la izquierda (de la imagen) y cuando entran al área de la tapadora empiezan el proceso de tapado, al finalizar el área las botellas ya se encuentran tapadas. Se considera un sistema de almacenamiento y caída libre de tapas hacia cada botella por medio de guías. Se utilizan bandas antigiro y sistema de generación de torque, se consideran también las restricciones impuestas por la embotelladora instalada, tales como espacio, formato de las botellas, torsión de tapado, velocidad de la banda transportadora, cantidad de botellas llenas por la sección anterior por minuto, entre otros detalles restrictivos.

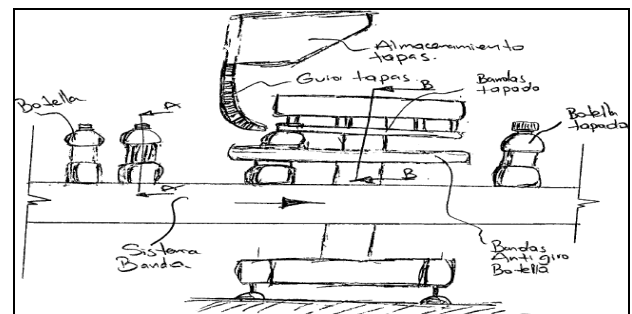


Figura 1. Boceto de la máquina tapadora.

¹ <http://lazar technologies.com/>

La figura 2, muestra un boceto a mano alzada que ilustra el concepto de estabilidad de botellas utilizando bandas laterales, aplicando una fuerza de rozamiento a la botella con dos bandas paralelas que la guían para el posterior proceso de tapado. También se muestra el Modelo CAD realizado en Solidworks.

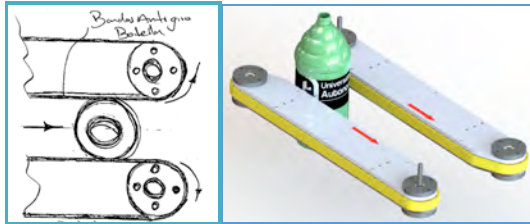


Figura 2. Concepto de tapado con acción de las bandas

Como condiciones importantes de este diseño se tienen en cuenta para este sistema que: 1) las bandas laterales deben tener la misma velocidad lineal de la banda transportadora existente en el laboratorio, ya que de no lograr una sincronía entre ambas velocidades, la botella se inclinará en sentido donde la velocidad sea mayor. 2) las bandas laterales deben ser de un material de un alto coeficiente de fricción con el PET (politereftalato de etileno), esto con el fin de evitar que la botella se gire en la fase de tapado. 3) las bandas laterales deben ser ajustables para el rango de diámetros de botellas referencia, el rango de ajuste debe ser de $\varnothing 50mm$ a $\varnothing 130mm$, esto con el fin de abarcar los diámetros comerciales de las botellas.

Una vez se tiene la botella estabilizada por las bandas laterales antigiro, se procede a realizar el suministro automático de la tapa, el presente trabajo toma como referencia únicamente el magazine de alimentación de las tapas, donde ya vienen ordenadas, alineadas y boca abajo, para ser tomadas por la botella, no se incluye dentro del desarrollo el sistema que ordena las tapas y las suministra al magazine, ya que es tan extenso que se podría usar como otro proyecto de complemento a la línea de embotellado. En la figura 3 se muestra la forma como el sistema de tapas se sincroniza con la botella a tapar y la secuencia de obtención de tapas.

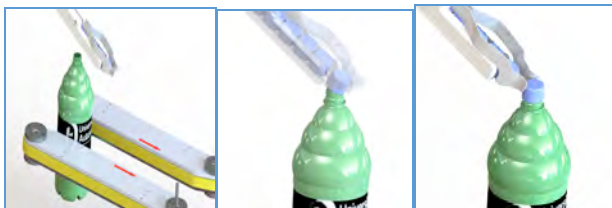


Figura 3. Suministro de tapa y secuencia de tapado.

Básicamente, el magazine de alimentación tiene un riel por donde se deslizan las tapas por gravedad, y son detenidas en el extremo del magazine por un sistema con resortes, el cual expone aproximadamente 1/3 del diámetro de la tapa, esperando que la botella pase y la

enganche con la boca, y por la fuerza y la firmeza generada por el sistema de bandas antigiro y por el contenido líquido de la botella, que vence el sistema con resortes y libera la tapa llevándola sobre puesta sobre la boca de la botella.

El concepto de roscado inicia con el principio básico de funcionamiento del sistema tuerca-tornillo, siendo análogo el funcionamiento de la tapa como la de la tuerca y la botella como el tornillo. Se genera un movimiento en sentido horario de la tapa sobre la botella, y esta se enrosca sobre los filetes de la botella, la idea es continuar con el giro en sentido horario, hasta conseguir el torque de 2 N.m, según como se recomienda en la Norma Técnica Colombiana NTC3762.

En el caso de la tapadora lineal, se genera el torque de la tapa con dos bandas en poliuretano que giran el sentido contrario entre sí, generando así un coeficiente de fricción alto entre la tapa y las bandas y así producir el giro en sentido horario a la tapa, como se muestra en la figura 4.



Figura 4. Mecanismo de tapado con bandas laterales.

El concepto de tapado-roscado tiene como principio un torque aplicado a la tapa, con una fuerza de fricción o rozamiento F_r , de forma tangencial a la tapa. Para garantizar que la fuerza de fricción sea alta, se debe aplicar una fuerza radial F_s , que es la fuerza ejercida por un tren de resortes con rodamientos, diseñado exclusivamente para este sistema, los cuales aumentan o disminuyen la fuerza a medida que varía su longitud o su deflexión. Este sistema trae como ventaja la adaptabilidad a diferentes diámetros de tapa, ya que con la ayuda de un servomecanismo, se puede controlar la apertura de las bandas y la deflexión de los resortes, controlando indirectamente el torque de tapado. En la figura 5 se muestra el concepto de roscado, en donde se muestran detalles del sistema con resortes y el contacto de las bandas. Este sistema es innovador en este tipo de máquinas ya que no se encontró evidencia de que se utilicen para tal fin.



Figura 5. Sistema con resortes de las bandas de roscado.

2.4 Cálculos del prototipo

Se obtuvieron cálculos realizados durante el proceso de diseño del prototipo. Estos cálculos fueron obtenidos en cada una de las etapas del diseño y permiten verificar las variables de diseño. En el esquema de la figura 6 se muestran algunos cálculos realizados.

Para el cálculo de la velocidad máxima que puede alcanzar una botella en la banda transportadora, se tiene en cuenta la velocidad tangencial de la polea en la salida del reductor, la cual es igual a la velocidad lineal de la banda transportadora y ésta, a su vez, es igual a la velocidad lineal de las botellas.

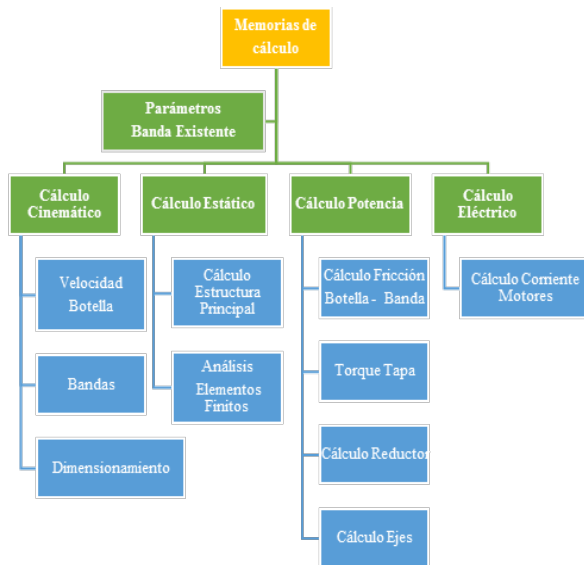


Figura 6. Esquema de cálculos realizados.

Para el cálculo de la velocidad tangencial de la botella se sigue (1), donde V_b es la velocidad de la botella, R_r es la relación del reductor 1:20, N_m es el valor de las revoluciones por minuto del motor, N_r es el valor de las revoluciones por minuto reductor, R_p es el radio de la polea de salida del reductor.

$$V_b = 2\pi N_r R_p \quad (1)$$

Siendo $N_m = 1590rpm$, $R_r = 1590/20$, $N_r = 79,5rpm$ y $R_p = 80mm$, reemplazando en la ecuación, se tiene $V_b = 2\pi(79,5)(0,08) = 40 \frac{m}{min}$. Esta velocidad es importante para el momento de dimensionar el sistema de tapado, ya que utiliza para calcular las longitudes de las bandas de roscado y los tiempos de tapado.

En cuanto al cálculo de las fuerzas de fricción F_{R1} y F_{R2} necesaria para tapar a $2N \cdot m$ la botella, según norma con $\phi_{tapa} = 30mm$ o Radio $R = 0.015mm$, ver figura 7. Realizando una sumatoria de momentos, se tiene:

$$RF_{R1} + RF_{R2} = 2N \cdot m \quad (2)$$

Reemplazando en (1) se tiene:

$$(0.015)F_{R1} + (0.015)F_{R2} = 2N \cdot m$$

$$F_{R1} = F_{R2} = 66.66N$$

El cálculo de la fuerza radial ejercida F_{s1} y F_{s2} para aumentar la fuerza de fricción y controlar el torque de tapado se calcula como $F_{R1} = F_N \mu$, siendo μ el coeficiente de fricción caucho-plástico, F_N la fuerza de reacción normal y $\mu = 0.4$, entonces $F_N = 166.66N$. Lo que resulta en dos resortes cada uno con una fuerza de 83.33N, ver figura 8.

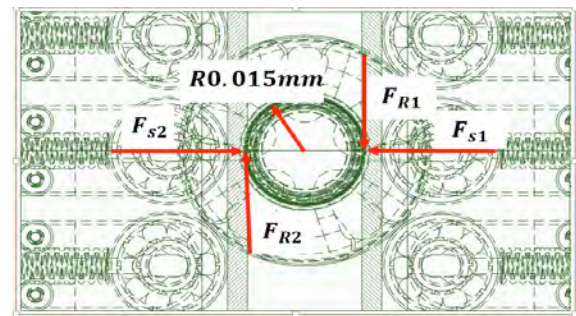


Figura 7. Fuerzas aplicadas en la tapa.

Datos del resorte: Ø3/8"x1" Medium Duty (Cod. Azul), longitud libre $L = 25.4mm$, deflexión max.50% de L, Fuerza 10,5 N por 1 mm de deflexión, $\Delta L = 7.93mm$, corresponde al 30% de L, deflexión donde el resorte tiene una fuerza de 83,33N, fuerza F_n requerida para tener un Par de 2 N.m en el tapado.

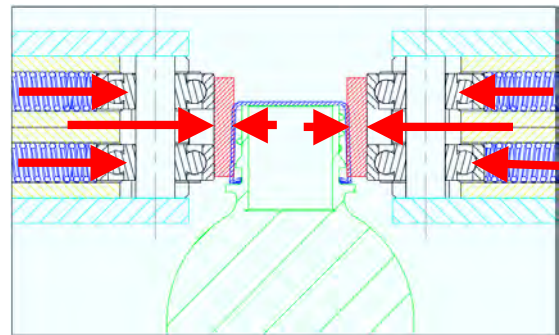


Figura 8. Acción reacción debidas a los resortes.

2.5 Integración Solidworks y LabVIEW

Para realizar la prueba FAT, se considera la integración del diseño en CAD electromecánico en Solidworks con el control del sistema en LabVIEW de National Instruments. Esta integración consiste en proporcionarle animación y movimiento a los componentes dados en el CAD en Solidworks por medio de la herramienta Solidworks Motion de SolidWorks y la herramienta NI SoftMotion de

National Instruments, la cual importa las propiedades del CAD a *Labview* para su control de movimiento y verificación de parámetros de diseño. En la figura 9 se muestra un esquema de la integración entre *Solidworks* por medio de *Solidworks Motion* y *LabVIEW* por medio de *NI SoftMotion*.

La figura 10 muestra una interfaz de operación de la parametrización del formato de las botellas, secuencia de arranque, inicio y parada del proceso de tapado realizada en *LabVIEW*. Entrando en detalles del panel frontal de la HMI, éste se divide en cuatro partes, que son: parámetros de botella, alistar motores, inicio de tapado y una pantalla para visualizar la frecuencia de trabajo de los motores de corriente alterna.

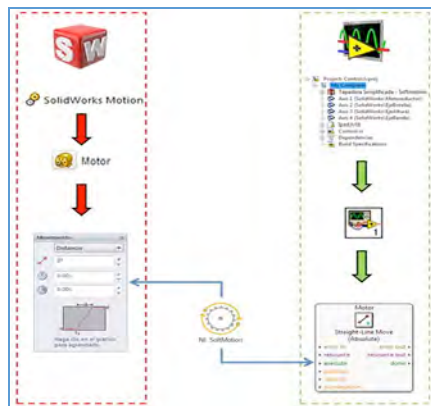


Figura 9. Integración Solidworks y Labview.

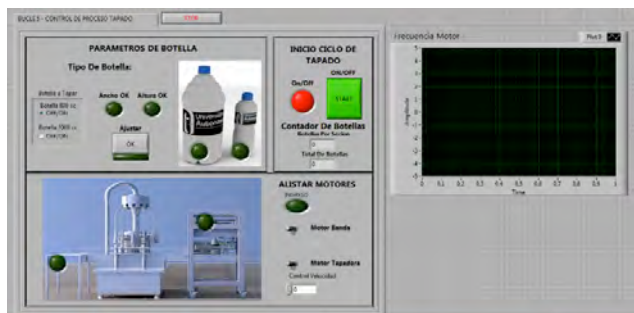


Figura 10. Sistema de transporte y llenado de botellas

En *Parámetros de botella*, este control recibe dos tipos de órdenes, botella de 600CC o 2000CC, al ingresar una de estas selecciones el sistema de tapado activa dos motores que se mueven en los ejes Y Z para dar la posición de tapado, ajustando ancho y alto de acuerdo al tipo de botella seleccionada. Para una botella 600CC, la altura será de 200mm y 70mm para el ancho; para la de 2000CC, su altura es de 300mm y su diámetro es de 130mm. La figura 11 ilustra la secuencia de ajuste en los ejes YZ descrita anteriormente. Cuando se hayan ejecutado los movimientos correspondientes, se encenderán dos pilotos tipo LED para indicarle al operario que la posición se ha ejecutado.



Figura 11. Secuencia de ajuste en los ejes YZ

En *Motores en marcha*, se condiciona el funcionamiento de la máquina; si no están activados los dos selectores no inicia el ciclo de tapado, esto con el fin de asegurarse del funcionamiento y sincronismo de las dos bandas transportadoras. Dado al sistema de tapado que funciona sobre la banda transportadora de botellas en línea con esta y la velocidad que esta lleve.

En *Inicio ciclo de tapado*, un pulsador arranque-paro, con un indicador booleano y un contador para la cantidad de botellas, arrancado con un indicador que muestra el estado de proceso (parado o tapando), se muestra un contador de botellas, uno indica el tapado de botellas por sesión y el otro el total de tapado de botellas en todas las sesiones.

Los requerimientos a prueba son los siguientes movimientos y condiciones para el proceso de roscado: 1) la velocidad de la banda transportadora de sujeción (bandas laterales de agarre de botellas) debe ser igual a la velocidad de la banda transporte de botellas (salida del proceso de llenado), 2) la velocidad del proceso de roscado es proporcional a la velocidad de desplazamiento de la botella, 3) los ajustes de los parámetros de tapado de las botellas (alto y ancho) se efectúan de forma automática seleccionando el tamaño de la botella que se va a producir antes de arrancar el proceso (600cc o 2000cc), y 4) debe haber un contador de botellas para producir lotes parciales y para conocer la cantidad de tiempo trabajado por la máquina. Esto con fin de efectuar mantenimientos preventivos a la máquina.

2.6 Prototipo final CAD

El prototipo final obtenido se muestra en la figura 12, en donde se aprecia el prototipo en escenario integrado con el proceso de llenado de botellas y en apariencia de estar en funcionamiento la tapadora lineal.



Figura 12. Prototipo final en CAD.

En la figura 13, se muestra el detalle de las bandas de estabilización y de tapado, así como también del sistema con resortes para el apriete de tapas.



Figura 13. Salida de botellas del proceso de tapado.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La integración de herramientas de *software* como *Labview* y *Solidworks* logra la realización de integración entre el control y los sistemas mecánicos, exigidos por el modelo en V.

La metodología Triz permite la disminución de tiempo para encontrar soluciones en un problema de diseño y permitió la innovación en algunos mecanismos para máquinas tapadoras lineales.

La metodología integrada permitió obtener un diseño que cumplió la prueba FAT del prototipo en CAD.

Más que recomendaciones, tenemos como trabajos futuros, la fabricación física de la máquina tapadora lineal, la realización del diseño de una máquina etiquetadora y el diseño de un módulo de control de calidad en línea.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Díaz, F., González, D. Development Model for Technological Products, *International Journal of Applied Science and Technology*, 3(8), 44–51. 2013.
- [2] Córdova, W. *TRIZ la herramienta del pensamiento e innovación sistemática*. Power Lines Group Perú SAC. 2012.
- [3] Pil, A.C. & Asada, H. Integrated Structure/Control Design of Mechatronics System Using a Recursive Experimental Optimization Method. *IEEE/Asme Transactions on Mechatronics*. Vol. 1, pp. 191-203. 1996.
- [4] Li, Q.; Zhang, W.J. & Chen, L. Design for Control-A Concurrent Engineering Approach for Mechatronic Systems Design. *IEEE/Asme Transaction on Mechatronics*. Vol. 6, No. 2, pp. 161-168. 1999.
- [5] Ravichandran, Th.; Wang D. & Heppler, G. Simultaneous Plant-Controller Design Optimization of a Two-Link Planar Manipulator. *Mechatronics*, 16(3-4): 233– 242. 2006.

- [6] Shigley, J. E. y Mitchell, L. D. *Manual de diseño mecánico*. México: McGraw- Hill. 1996.
- [7] Savant, C. J.; Roden, M. S. y Carpenter, G. L. *Diseño electrónico: circuitos y sistemas*. Addison-Wesley Iberoamericana. 1992.
- [8] Wang, L. T.; Chang, Y. W. & Cheng, K. T. *Electronic Design Automation: Synthesis, Verification, and Test*. Elsevier. 2009.
- [9] Zhang W.J.; Li Q. & Guo L.S. Integrated Design of Mechanical Structure and Control Algorithm for a Programmable Four-Bar Linkage. *IEEE/Asme Transaction on Mechatronics*. Vol. 4, No. 4, pp. 354-362. 1999.
- [10] FINK, Donald G. y BEATY, H. Wayne. *Standard Handbook for Electrical Engineers*. 15th Edition. New York: McGraw-Hill Professional Publishing, 2006. p. 1713-1716, 1721-1722.
- [11] HICKEY, Robert B. *Electrical Engineer's Portable Handbook*. 2nd Edition. New York: McGraw-Hill Professional Publishing, 2003. 403 p.
- [12] Traister, John E. y Sclater, Neil. *Handbook of Electrical Design Details*. 2nd Edition. New York: McGraw-Hill Professional Publishing, 2003. p. 305, 317, 319-320.
- [13] Norma Técnica Colombiana NTC3762.
- [14] Adolph Schneider, *Bottling-machine*. US 651727 A, Jun. 12, 1900.
- [15] Cozzoli J. *Automatic bottle cleaning machine*. US 3804103 A. Abr. 16, 1974

CONTROL BASADO EN OBSERVADORES GPI DE UN HELICÓPTERO 2-DOF: ENFOQUE DE RECHAZO ACTIVO DE PERTURBACIONES

GPI observer-based control of a 2-DOF helicopter: An active disturbance rejection approach

RESUMEN

En este trabajo se propone un esquema de control multivariable desacoplado, bajo el enfoque de rechazo activo de perturbaciones, para un helicóptero de dos grados de libertad (H-2DOF). El núcleo del esquema propuesto es el uso de observadores de tipo Proporcional Integral Generalizado (GPI) encargados de estimar las perturbaciones causadas por no lineales, elementos no modelados, incertidumbres en los parámetros, y perturbaciones externas asociadas a cada lazo desacoplado. Posteriormente se propone un conjunto de leyes de control lineal para la cancelación del efecto de las perturbaciones generalizadas. Se presentan fielmente los resultados experimentales que validan el esquema de control propuesto.

Palabras clave: control multivariable, helicóptero 2-DOF, observador GPI, rechazo activo de perturbaciones.

ABSTRACT

This work proposes a multivariable decoupled control scheme on the active disturbance rejection framework for a two degrees of freedom helicopter (H-2 DOF). The core of the proposed scheme is the use of Generalized Proportional Integral (GPI) observers, which are in charge to estimate the disturbances caused by nonlinearities, unmodeled elements, parameter uncertainties and external disturbances, associated with the decoupled loops. Subsequently we propose a set of linear control laws to cancel the effect of generalized disturbances. Finally, experimental results validating the proposed control scheme are provided.

Keywords: active disturbance rejection, GPI observer, multivariable control, 2-DOF helicopter.

1. INTRODUCCIÓN

El rechazo de perturbaciones es un requerimiento indispensable en la mayoría de los sistemas de control en la actualidad [1]. En el contexto del control de sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), el rechazo de perturbaciones se convierte en el eje de un grupo sólido y ampliamente aceptado de estrategias de control, denominado *desacoplado*, en el que se pretende reducir el sistema MIMO a un conjunto de subsistemas de una-entrada-una-salida (SISO) independientes, separando al máximo las interacciones entre los pares entrada-salida dominantes [2].

Existen numerosas contribuciones que apoyan el uso de las estrategias de control multivariable desacoplado, caracterizadas por su enfoque lineal [3]; sin embargo, aspectos como la robustez ante las no linealidades, la incertidumbre en los parámetros y el rechazo de perturbaciones exógenas, siguen siendo motivo de estudio en diversos campos de la ingeniería de control [4]. Por otra parte, en las últimas décadas han surgido

enfoques centrados en la observación-estimación de perturbaciones, en los que el desempeño está asociado en buena medida al conocimiento detallado del modelo del sistema, aspecto que dificulta su implementación práctica [4, 5].

Como alternativa para minimizar los requerimientos del modelado y mejorar la robustez, ha surgido un nuevo enfoque denominado *Control por rechazo activo de perturbaciones* (ADRC), con amplias contribuciones en los ámbitos académico e industrial. El concepto general del ADRC es el de considerar los efectos producidos por las no linealidades, las perturbaciones exógenas y las incertidumbres en los parámetros, dentro de una única función de perturbación generalizada, carente de una estructura particular. De esta manera, el objetivo es lograr una estimación en línea de la señal de perturbación generalizada y poder cancelar su efecto usando una ley de control realimentado [5, 6].

Durante los últimos años se han desarrollado varias técnicas de control bajo el enfoque ADRC. Este es el

HARVEY DAVID ROJAS

Lic. en Electrónica, Esp., M.Sc (c)
Profesor - Investigador
Servicio Nacional de Aprendizaje
SENA
davidrc@misena.edu.co
Profesor
Universidad Central
hrojasc1@ucentral.edu.co

JOHN CORTÉS ROMERO

Ingeniero electricista, Ph.D.
Profesor Asociado
Universidad Nacional de Colombia
jacortesr@unal.edu.co

HÉRBERT ENRIQUE ROJAS

Ingeniero electricista, Ph.D.(c).
Profesor Asistente
Universidad Distrital Francisco José
de Caldas
herojasc@udistrital.edu.co

caso del control *Proporcional Integral Generalizado* (GPI) y su extensión, denominada *Control basado en observador GPI*. Las técnicas de control GPI han sido utilizadas en numerosas aplicaciones, como control de máquinas eléctricas [7], electrónica de potencia [8], sistemas mecánicos [9], eficiencia energética [10] y en aplicaciones de control en modo deslizante [6]. En general, las técnicas de control GPI son aptas para trabajar con sistemas lineales y no lineales en donde se disponga de poca información del modelo del sistema (tales como el orden y la constante que acompañan al control), aspectos que hacen a estas técnicas muy atractivas a la hora de abordar procesos complejos, con altas incertidumbres, fuertemente perturbados e incluso afectados por fallas.

En el presente trabajo se propone un esquema de control multivariable desacoplado, bajo el enfoque de rechazo activo de perturbaciones, para un helicóptero de dos grados de libertad (H-2DOF). Inicialmente se plantea una estrategia de desacople partiendo del modelo no lineal del H-2DOF, al que se reduce a un conjunto de subsistemas de una-entrada-una-salida, perturbados por funciones generalizadas que integran los efectos de las no linealidades, elementos no modelados, incertidumbres en los parámetros y perturbaciones externas. Para la estimación de las señales de perturbación se propone el uso de observadores estados extendidos del tipo Proporcional Integral Generalizado (GPI), y la cancelación en línea de las perturbaciones se efectúa usando leyes de control lineal.

Este artículo tiene la siguiente organización: en la sección 2 se presenta una descripción del helicóptero de dos grados de libertad (H-2DOF), que incluye el modelo no lineal considerado y la formulación del problema de control. En la sección 3 se presenta la estrategia de control multivariable que hace uso de observadores GPI bajo el marco de rechazo activo de perturbaciones. En el acápite 4 se presentan los resultados experimentales que validan el esquema de control propuesto. Finalmente, en la sección 5 se exponen las conclusiones generales del trabajo.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El helicóptero de dos grados de libertad (H-2DOF) es un sistema aerodinámico, multivariable, no lineal y altamente acoplado, que permite observar un comportamiento simplificado del helicóptero real, con un número reducido de grados de libertad [11, 12]. En la figura 1 se presenta un esquema simplificado del H-2DOF, incluyendo las fuerzas que interactúan y la ubicación del centro de masa del sistema.

El sistema consta de dos rotores accionados por motores de corriente directa (frontal y trasero). Durante su funcionamiento, la nariz del H-2DOF puede inclinarse un

ángulo θ en el eje de *Pitch*, que es definido positivo cuando se eleva. Asimismo, el helicóptero puede rotar un ángulo ψ alrededor del eje de *Yaw*, definido positivo cuando el aparato se mueve en el sentido de las manecillas del reloj.

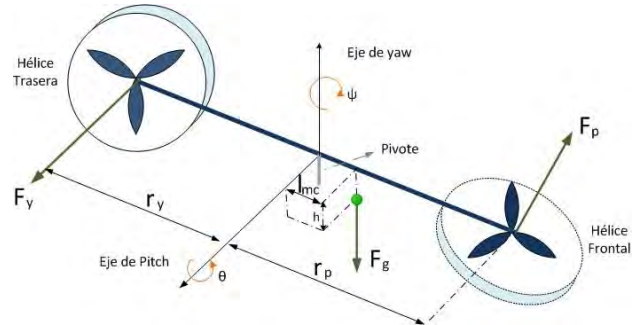


Figura 1. Esquema general de fuerzas en el H-2DOF.

2.1 Modelo matemático del H-2DOF

El modelo matemático del H-2DOF puede encontrarse definiendo las ecuaciones de movimiento de Lagrange - Euler para un sistema dinámico de dos grados de libertad. [12], [13]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = FG_{\theta} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial L}{\partial \dot{\psi}} - \frac{\partial L}{\partial \psi} = FG_{\psi} \quad (2)$$

donde L es la variable de Lagrange, definida como la diferencia entre las energías cinética y potencial; y FG_{θ} y FG_{ψ} son las fuerzas generalizadas consideradas en el eje de Pitch y Yaw respectivamente.

Para calcular las energías cinética y potencial es indispensable encontrar la posición cartesiana del centro de masa con respecto al pivote, haciendo uso de matrices de transformación homogéneas [14]. Para el caso particular, el centro de masa no se encuentra en el pivote sino a una distancia l_{mc} a lo largo de la longitud del fuselaje y a una altura h por debajo de este; por tanto, la posición del centro de masa es:

$$\begin{aligned} X_{mc} &= (l_{mc} \cos \theta(t) + h \sin \theta(t)) \cos \psi(t) \\ Y_{mc} &= (-l_{mc} \cos \theta(t) - h \sin \theta(t)) \sin \psi(t) \\ Z_{mc} &= l_{mc} \sin \theta(t) - h \cos \theta(t) \end{aligned} \quad (3)$$

Realizando el cálculo operacional correspondiente, se obtiene el siguiente modelo para el H-2DOF:

$$\begin{aligned} & [J_{eqp} + M_{heli} (l_{mc}^2 + h^2)] \ddot{\theta}(t) \\ & + M_{heli} \left[\frac{\sin(2\theta(t)) (l_{mc}^2 - h^2)}{2} - (l_{mc} h \cos(2\theta(t))) \right] (\dot{\psi}(t))^2 \\ & + [M_{heli} g (l_{mc} \cos \theta(t) + h \sin \theta(t))] \end{aligned}$$

$$= K_{pp}V_{mp}(t) + K_{py}V_{my}(t) - B_p\dot{\theta}(t) - F_{cp} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & [J_{eqy} + M_{heli} [\cos^2 \theta(t) (l_{mc}^2 - h^2) + (l_{mc}h \sin(2\theta(t))) + (h^2)]] \ddot{\psi}(t) \\ & + M_{heli} [-\sin(2\theta(t)) (l_{mc}^2 - h^2) + 2(l_{mc}h \cos(2\theta(t)))] \dot{\psi}(t)\dot{\theta}(t) \\ & = K_{yp}V_{mp}(t) + K_{yy}V_{my}(t) - B_y\dot{\psi}(t) - F_{cy} \end{aligned} \quad (5)$$

donde $V_{mp}(t)$ es el voltaje aplicado al motor de la hélice frontal (motor Pitch) y $V_{my}(t)$ es el voltaje aplicado al motor de la hélice trasera (motor Yaw); J_{eqp} y J_{eqy} son los momentos de inercia equivalentes en los ejes de Pitch y Yaw; M_{heli} es la masa móvil total del helicóptero; y l_{mc} y h son las posiciones del centro de masa en los ejes X y Z respectivamente.

La ecuación (4) describe el movimiento en el eje de Pitch, donde los parámetros K_{pp} y K_{py} son constantes que relacionan los voltajes aplicados a los motores con los torques generados en el eje de Pitch; B_p es el coeficiente de fricción viscosa; y F_{cp} es una constante debida a la fricción de Coulomb en el eje de Pitch. Por su parte, (5) describe el movimiento en el eje de Yaw, donde los parámetros K_{yp} y K_{yy} son constantes que relacionan el voltaje aplicado a los motores con los torques generados en el eje de Yaw; B_y es el coeficiente de fricción viscosa; y F_{cy} es una constante debida a la fricción de Coulomb en el eje de Yaw [12].

2.2. Formulación del problema de control

Dadas unas trayectorias de referencia $\theta^*(t)$ y $\psi^*(t)$ para las posiciones angulares del H-2DOF, se busca proponer una ley de control realimentado de tal forma que se tenga una convergencia, suficientemente cercana de las salidas medibles (posiciones angulares), aun en presencia de perturbaciones desconocidas causadas por incertidumbre en los parámetros, linealidades no modeladas y la presencia de perturbaciones externas variantes en el tiempo.

3. CONTROL DEL H-2DOF CON ENFOQUE DE RECHAZO ACTIVO DE PERTURBACIONES

3.1. Formulación simplificada del modelo del H-2DOF

El primer paso para el diseño es lograr una representación simplificada y desacoplada de la dinámica del sistema no lineal de (4) y (5). Para ello se propone la siguiente formulación:

$$\ddot{\theta}(t) = \kappa_{\theta}(t)u_{\theta}(t) + \xi_{\theta}(t) \quad (6)$$

$$\ddot{\psi}(t) = \kappa_{\psi}(t)u_{\psi}(t) + \xi_{\psi}(t) \quad (7)$$

donde se definen las señales auxiliares de control

$$u_{\theta}(t) = K_{pp}V_{mp}(t) + K_{py}V_{my}(t) \quad (8)$$

$$u_{\psi}(t) = K_{yp}V_{mp}(t) + K_{yy}V_{my}(t) \quad (9)$$

Partiendo de (8) y (9) se propone la siguiente transformación inversa para el cálculo de los voltajes asociados a los motores:

$$\begin{bmatrix} V_{mp}(t) \\ V_{my}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{pp} & K_{py} \\ K_{yp} & K_{yy} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_{\theta}(t) \\ u_{\psi}(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

Por su parte, las funciones que acompañan a las señales auxiliares de control son:

$$\kappa_{\theta}(t) = \frac{1}{J_{eqp} + M_{heli} (l_{mc}^2 + h^2)} \quad (11)$$

$$\kappa_{\psi}(t) = \frac{1}{J_{eqy} + M_{heli} [\cos^2 \theta(t) (l_{mc}^2 - h^2) + (l_{mc}h \sin(2\theta(t))) + (h^2)]} \quad (12)$$

Finalmente, las funciones de perturbación aditivas generalizadas ($\xi_{\theta}(t)$ y $\xi_{\psi}(t)$) se componen de las perturbaciones endógenas asociadas al modelo establecido ($\zeta_{\theta}(t)$ y $\zeta_{\psi}(t)$), y de las perturbaciones completamente desconocidas asociadas a incertidumbres en los parámetros, dinámicas no modeladas y perturbaciones externas desconocidas ($\varpi_{\theta}(t)$ y $\varpi_{\psi}(t)$). En resumen:

$$\xi_{\theta}(t) = \zeta_{\theta}(t) + \varpi_{\theta}(t) \quad (13)$$

$$\xi_{\psi}(t) = \zeta_{\psi}(t) + \varpi_{\psi}(t) \quad (14)$$

con

$$\begin{aligned} \zeta_{\theta}(t) = & \frac{-M_{heli} \left[\frac{\sin(2\theta(t))(l_{mc}^2 - h^2)}{2} - (l_{mc}h \cos(2\theta(t))) \right] (\dot{\psi}(t))^2}{J_{eqp} + M_{heli} (l_{mc}^2 + h^2)} \\ & - \frac{[M_{heli}g(l_{mc} \cos \theta(t) + h \sin \theta(t))] - B_p\dot{\theta}(t) - F_{cp}}{J_{eqp} + M_{heli} (l_{mc}^2 + h^2)} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \zeta_{\psi}(t) = & \frac{-M_{heli} [-\sin(2\theta(t)) (l_{mc}^2 - h^2) + 2(l_{mc}h \cos(2\theta(t)))] \dot{\psi}(t)\dot{\theta}(t)}{J_{eqy} + M_{heli} [\cos^2 \theta(t) (l_{mc}^2 - h^2) + (l_{mc}h \sin(2\theta(t))) + (h^2)]} \\ & - \frac{B_y\dot{\psi}(t) - F_{cy}}{J_{eqy} + M_{heli} [\cos^2 \theta(t) (l_{mc}^2 - h^2) + (l_{mc}h \sin(2\theta(t))) + (h^2)]} \end{aligned} \quad (16)$$

3.2. Control multivariable desacoplado basado en el observador GPI

Teniendo en cuenta la dinámica simplificada de (6) se propone la siguiente ley de control basada en observador para la dinámica SISO del eje de Pitch.

$$u_{\theta}(t) = \frac{1}{\kappa_{\theta}(t)} \left[[\hat{\theta}^*(t)]^{(2)} - k_{\theta 0} (\hat{\theta}(t) - \theta^*(t)) - k_{\theta 1} (\hat{\dot{\theta}}(t) - [\hat{\theta}^*(t)]^{(1)}) - \hat{\dot{\theta}}(t) \right] \quad (17)$$

donde las señales estimadas $\hat{\theta}(t)$, $\hat{\dot{\theta}}(t)$, $\hat{\xi}_{\theta}(t)$ son provistas por un observador GPI que incorpora un modelo interno de la perturbación generalizada en Pitch, tal que

$\frac{d^3 \xi_\theta(t)}{dt^3} = 0$. De esta forma se establece el siguiente modelo en variables de estado para el observador GPI.

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{\theta}(t)}{dt} \\ \frac{d\hat{\dot{\theta}}(t)}{dt} \\ \frac{d\hat{\xi}_\theta(t)}{dt} \\ \frac{d\hat{\xi}_\theta^{(2)}(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}(t) \\ \hat{\dot{\theta}}(t) \\ \hat{\xi}_\theta(t) \\ \hat{\xi}_\theta^{(2)}(t) \end{bmatrix} + \kappa_\theta(t) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_\theta(t) + \begin{bmatrix} l_{\theta 4} \\ l_{\theta 3} \\ l_{\theta 2} \\ l_{\theta 0} \end{bmatrix} \tilde{e}_\theta(t) \quad (18)$$

A partir de (18) se puede determinar la dinámica del error de observación en eje de Pitch, $\tilde{e}_\theta(t) = \theta(t) - \hat{\theta}(t)$, que está dada por el siguiente polinomio característico en el plano s:

$$p_{\tilde{e}_\theta}(s) = s^5 + l_{\theta 4}s^4 + l_{\theta 3}s^3 + l_{\theta 2}s^2 + l_{\theta 1}s + l_{\theta 0} \quad (19)$$

Es posible analizar también la dinámica del error de seguimiento en el eje de Pitch, definido como $e_{y\theta}(t) = \theta(t) - \theta^*(t)$, si se reemplaza la ley de control (17) en la dinámica simplificada (6):

$$[e_{y\theta}(t)]^{(2)} + k_{\theta 1}[e_{y\theta}(t)]^{(1)} + k_{\theta 0}[e_{y\theta}(t)] = \tilde{e}_{\xi_\theta}(t) + k_{\theta 1} \frac{d\tilde{e}_\theta(t)}{dt} + k_{\theta 0}\tilde{e}_\theta(t) \quad (20)$$

Considerando que el error de estimación $\tilde{e}_{x\theta}$ y sus derivadas son uniforme y absolutamente acotadas [6], la dinámica del error de seguimiento viene dominada aproximadamente por el siguiente polinomio característico en el plano s:

$$p_{e_{y\theta}}(s) = s^2 + k_{\theta 1}s + k_{\theta 0} \quad (21)$$

donde los coeficientes $[l_{\theta 4} \ l_{\theta 3} \ l_{\theta 2} \ l_{\theta 1} \ l_{\theta 0}]$ y $[k_{\theta 1} \ k_{\theta 0}]$ pueden ser seleccionados para satisfacer las especificaciones.

De manera análoga se propone la siguiente ley de control basada en observador para la dinámica SISO del eje de Yaw de (7):

$$u_\psi(t) = \frac{1}{\kappa_\psi(t)} \left[[\psi^*(t)]^{(2)} - k_{\psi 0}(\tilde{\psi}(t) - \psi^*(t)) - k_{\psi 1}(\dot{\tilde{\psi}}(t) - [\dot{\psi}^*(t)]^{(1)}) - \dot{\xi}_\psi(t) \right] \quad (22)$$

donde las señales estimadas, $\hat{\psi}(t)$, $\hat{\dot{\psi}}(t)$, $\hat{\xi}_\psi(t)$, son provistas por el siguiente observador GPI, que incorpora $\frac{d^2 \xi_\psi(t)}{dt^2} = 0$ como modelo interno de la perturbación generalizada en Yaw.

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{\psi}(t)}{dt} \\ \frac{d\hat{\dot{\psi}}(t)}{dt} \\ \frac{d\hat{\xi}_\psi(t)}{dt} \\ \frac{d\hat{\xi}_\psi^{(2)}(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\psi}(t) \\ \hat{\dot{\psi}}(t) \\ \hat{\xi}_\psi(t) \\ \hat{\xi}_\psi^{(2)}(t) \end{bmatrix} + \kappa_\psi(t) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_\psi(t) + \begin{bmatrix} l_{\psi 3} \\ l_{\psi 2} \\ l_{\psi 1} \\ l_{\psi 0} \end{bmatrix} \tilde{e}_\psi \quad (23)$$

donde la dinámica del error de estimación en Yaw, $\tilde{e}_\psi(t) = \psi(t) - \hat{\psi}(t)$, está dada por el siguiente polinomio característico en el plano s:

$$p_{\tilde{e}_\psi}(s) = s^4 + l_{\psi 3}s^3 + l_{\psi 2}s^2 + l_{\psi 1}s + l_{\psi 0} \quad (24)$$

Bajo las consideraciones planteadas, la dinámica de seguimiento en el eje de Yaw, $e_{y\psi}(t) = \psi(t) - \psi^*(t)$ está dominada por el siguiente polinomio característico en el plano s:

$$p_{e_{y\psi}}(s) = s^2 + k_{\psi 1}s + k_{\psi 0} \quad (25)$$

donde los coeficientes $[l_{\psi 3} \ l_{\psi 2} \ l_{\psi 1} \ l_{\psi 0}]$ y $[k_{\psi 1} \ k_{\psi 0}]$ pueden ser seleccionados para satisfacer las especificaciones.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los experimentos fueron realizados usando la plataforma de experimentación H-2DOF de Quanser® (consulte la referencia [12] para mayores detalles). El *software* para control en tiempo real es WinCon de Quanser®, con el que se compilan los diagramas desarrollados en Simulink de Matlab® con un período de muestreo de 1 ms.

4.3. Resultados experimentales sin perturbaciones externas

Como primer caso de estudio se consideró un problema típico de seguimiento de referencias en la posición angular del helicóptero, libre de perturbaciones externas. Las señales de referencia para la posición angular del helicóptero son: $\theta^*(t) = -10 + 20 \sin(0.1t + 3\pi/2)$ para el eje de Pitch, y $\psi^*(t) = 20 + 15 \sin(0.1t + 3\pi/2)$ para el eje de Yaw. Las unidades en ambos casos son grados.

Las ganancias del observador GPI par al eje de Pitch se ajustaron usando un polinomio característico de la forma $(s^2 + 2zws + w^2)^2 (s + w)$ con $w = 12$ y $z = 7$. Las ganancias del observador GPI par al eje de Yaw se ajustaron usando un polinomio característico de la forma $(s^2 + 2zws + w^2)^2$ con $w = 10$ y $z = 1.2$. A su vez, las ganancias de los controladores fueron ajustadas usando un polinomio característico de la forma $s^2 + 2zws + w^2$, con $w = 0.5$ y $z = 1$ para el control en Pitch, y con $w = 0.65$ y $z = 1$ para el control en Yaw.

En las figuras 2-a y 2-b se muestran el seguimiento y el error de seguimiento de la referencia en el eje de Pitch. Las figuras 3-a y 3-b muestran el seguimiento y el error de seguimiento de la referencia en el eje de Yaw. Las estimaciones de las funciones de perturbación generalizadas en los ejes de Pitch y Yaw se presentan en las figuras 2-c y 3-c respectivamente.

Las señales de control auxiliar y los voltajes aplicados a los motores se presentan en las figuras 4-a y 4-b:

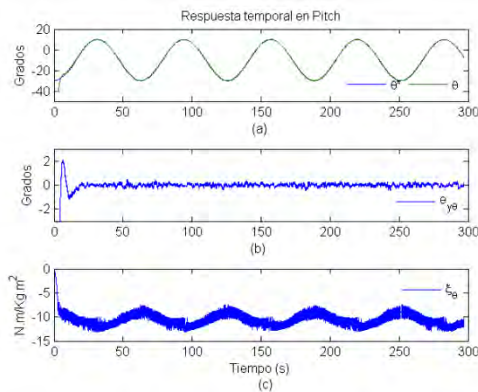


Figura 2. Respuesta temporal en el eje de Pitch sin perturbaciones externas.

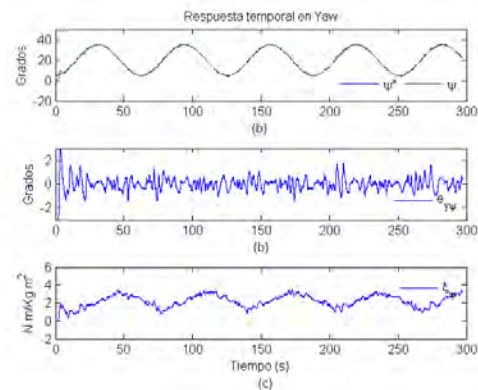


Figura 3. Respuesta temporal en el eje de Yaw sin perturbaciones externas.

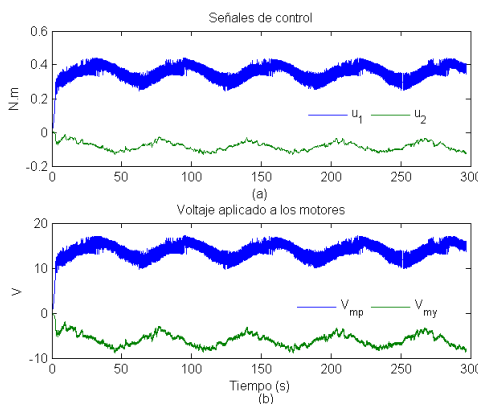


Figura 4. Señales de control y voltajes aplicados a los motores sin perturbaciones externas.

Los resultados experimentales del sistema de control, libre de perturbaciones externas, muestran un excelente desempeño en el seguimiento de referencias, caracterizado por errores de seguimiento bajos, lo que demuestra la cancelación activa de los efectos de las no linealidades, las incertidumbres en los parámetros y los elementos no modelados.

4.4. Resultados experimentales con perturbaciones externas

A fin de validar la robustez del esquema de control propuesto, se plantea ahora el problema de seguimiento de referencias en presencia de perturbaciones externas desconocidas. Estas perturbaciones fueron generadas usando un ventilador externo ubicado en una posición fija, con su correspondiente accionamiento electrónico, caracterizado por un perfil de tensión reproducible que produce ráfagas de viento de intensidad variable durante la prueba.

Para el sistema con perturbaciones externas, las figuras 4-a y 4-b muestran el seguimiento y el error de seguimiento de la referencia en el eje de Pitch. En las figuras 5-a y 5-b se muestran el seguimiento y el error de seguimiento de la referencia en el eje de Yaw. Las estimaciones de las funciones de perturbación generalizadas, que incluyen el efecto de perturbaciones externas en los ejes de Pitch y Yaw, se presentan en las figuras 4-c y 5-c respectivamente.

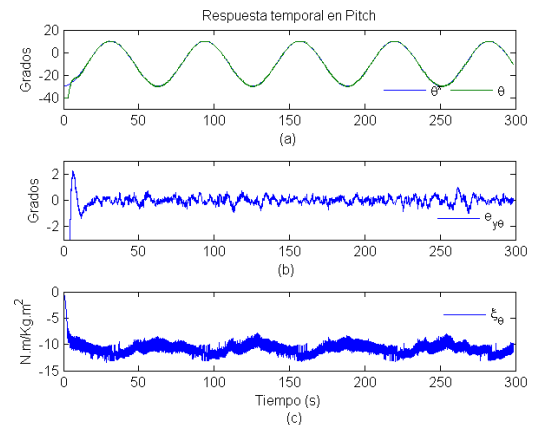


Figura 4. Respuesta temporal en el eje de Pitch en presencia de perturbaciones externas

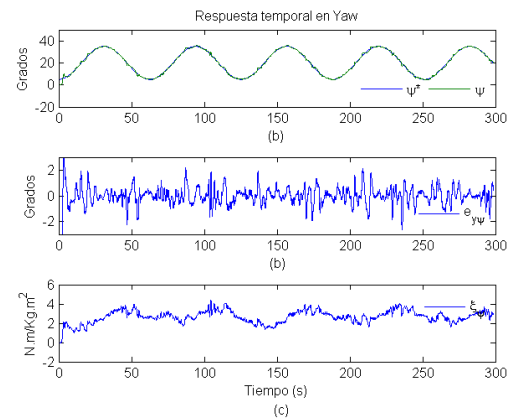


Figura 5. Respuesta temporal en el eje de Yaw en presencia de perturbaciones externas.

Las señales de control auxiliar y los voltajes aplicados a los motores del sistema con perturbaciones externas se presentan en las figuras 6-a y 6-b:

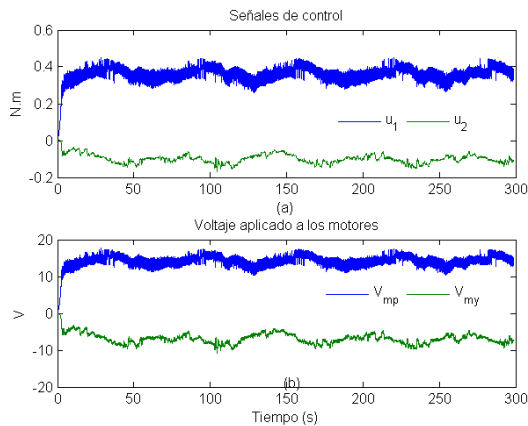


Figura 6. Señales de control y voltajes aplicados a los motores en presencia de perturbaciones externas

Los resultados experimentales del sistema de control con perturbaciones externas desconocidas muestran un excelente desempeño en el seguimiento de referencias, comparado con el caso libre de perturbaciones externas. Cabe anotar que la ubicación de polos de controladores y observadores, y las señales de referencias, fueron iguales en los dos casos considerados.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se propuso un esquema de control multivariable desacoplado, bajo el enfoque de rechazo activo de perturbaciones, para un helicóptero de dos grados de libertad (H-2DOF). La estrategia considera el uso de observadores de tipo Proporcional Integral Generalizado (GPI) para obtener estimaciones de los estados del sistema y de las funciones de perturbación asociadas a cada lazo de control formulado en el desacople. La estimación y posterior cancelación en línea de las perturbaciones generalizadas, que integran efectos intrínsecos dependientes de los estados y de perturbaciones externas variantes en el tiempo, permiten garantizar el desempeño del sistema en tareas de seguimiento de referencias.

Se demostró por medio de pruebas experimentales que el esquema propuesto es apto para el control desacoplado de sistemas multivariable no lineales, como el H-2DOF. Los resultados experimentales permiten probar que el uso de controladores lineales independientes, basados en observadores GPI, permite mantener el desempeño del sistema multivariable, aun en presencia de condiciones adversas de operaciones, tales como efectos no lineales, errores de modelado, incertidumbre en los parámetros, cambios continuos de punto de operación y perturbaciones externas desconocidas, aspectos que son comunes en aplicaciones industriales y académicas reales.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Takatsu, y T. Itoh, "Future needs for control theory in industry-report of the control technology survey in Japanese industry", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 7, n° 3, pp. 298-305, May 1999.
- [2] Q. Zheng, Z. Chen, y Z. Gao, "A dynamic decoupling control approach and its applications to chemical processes", *Proceedings of the 2007 American Control Conference*, New York City, USA, 2007.
- [3] Q. Wang, *Decoupling Control*, Springer, 2003.
- [4] Q. Zheng, Z. Chen, y Z. Gao, "A practical approach to disturbance decoupling control", *Control Engineering Practice*, vol. 17, n° 9, pp. 1016-1025, 2009.
- [5] Z. Gao, "Active disturbance rejection control: a paradigm shift in feedback control system design", *American Control Conference*, 2006.
- [6] J. Cortés, H. Rojas, H. Coral, H. Sira, y A. Luviano, "Active disturbance rejection approach for robust fault-tolerant control via observer assisted sliding mode control", *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2013, pp. 1-12, 2013.
- [7] J. Cortés, "Métodos algebraicos de identificación y estimación en el control de motores de inducción", Tesis de maestría, México D.F., 2011.
- [8] H. Sira, J. Cortés, y A. Luviano, "A GPI sliding mode control approach for linear controllable switched systems", *11th International Workshop on Variable Structure Systems (VSS)*, Mexico City, 2010.
- [9] A. Luviano, y J. Cortés, "Robust discrete generalized proportional integral control: application in mechanical systems control", *European Control Conference*, Budapest, Hungary, 2009.
- [10] H. Coral, J. Cortés, y G. Ramos, "Robust active disturbance rejection control approach to maximize energy capture in variable-speed wind turbines", *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2013, 2013.
- [11] I. Palunko, y S. Bogdan, "Small helicopter control design based on model reduction and decoupling", *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 54, n° 1-3, pp. 201-228, Mar. 2009.
- [12] Quanser, *Aerospace Plant: 2-DOF Helicopter, Position Control*, Reference Manual, 2006.
- [13] J. Guarnizo, C. Trujillo, y J. Guacaneme, "Modeling and control of a two-DOF helicopter using a robust control design based on DK iteration", 2010.
- [14] A. Ollero, *Robótica: Manipuladores y robots móviles*, Barcelona, España, Marcombo, 2001.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GRIPPER IMPLEMENTANDO OPTIMIZACIÓN

Design and construction of a gripper implementing optimization

RESUMEN

El presente artículo tiene como propósito presentarle al lector la forma como se diseñó una pinza industrial para la sujeción de objetos. Se muestran las fuerzas que interactúan en el sistema a partir de un motoreductor, y cómo garantizar una fuerza de aprensión sobre los objetos. La fuerza sobre el objeto es de tipo no lineal, por lo tanto se busca garantizar un nivel de fuerza adecuado y se realiza por medio de una optimización mecánica. Esta optimización se aplica a una de las barras del sistema de cuatro barras. El algoritmo utilizado para la optimización es evolución diferencial.

Palabras clave: diferencial, fuerza, optimización, pinza.

ABSTRACT

This paper aims to introduce the reader to design an industrial gripper for grasp objects. Show the forces that interact in the system from the motor-gear, and how to ensure a force of apprehension on objects. The force on the object is not linear, therefore seeks to ensure an adequate level of strength and is by means of a mechanical optimization. This optimization is applied to one of the bars of the four-bar system. The algorithm is used for optimization differential evolution.

Keywords: Differential, Force, Optimization, Gripper.

ALONSO CHICA LEAL

Ingeniero electricista, M. Sc.
Profesor auxiliar
Universidad Central
achical@ucentral.edu.co

VLADIMIR PRADA JIMÉNEZ

Ingeniero Mecatrónico, M. Sc.
Docente auxiliar.
Universidad Central
vpradaj@ucentral.edu.co

HERNÁN REY HERNÁNDEZ

Ingeniero electrónico
Universidad Central
feliperey4@hotmail.com

CARLOS LEÓN HIDALGO

Ingeniero electrónico
Universidad Central
calex_885@hotmail.com

1. INTRODUCCIÓN

El *gripper* es un sistema electromecánico utilizado principalmente para la sujeción de objetos. El *gripper* del presente trabajo utiliza un motor DC con reductor mecánico de velocidad acoplado a un mecanismo de cuatro barras como generador de trayectoria para sujetar las botellas que se van a retirar de un proceso de rechazo de botellas en un sistema de control de calidad. El mecanismo es una secuencia cerrada de barras conectadas por articulaciones. Tres de las cuatro barras generan movimiento ya que una siempre permanece fija. Este mecanismo se emplea para transmitir la fuerza del motor DC a la pieza que sujeta la botella.

En la figura 1.1 se muestran las cuatro barras marcadas con b1, b2, b3 y b4 y funcionan de la siguiente manera:

La barra b1 carece de movimiento, es siempre fija a un punto de referencia, por lo tanto es la base del sistema de cuatro barras. La barra b2 se mueve debido al movimiento de la barra b3 y es la misma pieza que ejerce la fuerza para sujetar la botella, debido a esto tiene que ser la barra que recibe la fuerza transmitida por todo el mecanismo de cuatro barras. La barra b3 es la barra superior encargada de transmitir la fuerza y el movimiento de b4 a b2. La barra b4, en este caso, siempre estará estática rotacionalmente pero varía su desplazamiento longitudinal por medio de un tornillo

sinfin que está acoplado al motor DC, transmitiendo la fuerza y proporcionando movimiento lineal a partir de uno rotacional a todo el mecanismo.

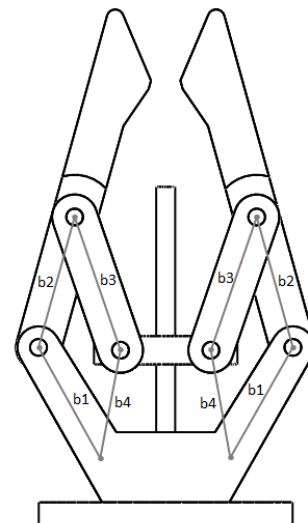


Figura 1. Mecanismo de cuatro barras utilizado para el *gripper*.

2. ANÁLISIS DE FUERZAS DEL GRIPPER

Para saber la fuerza tangencial que el motor aplica al tornillo, se realiza el siguiente análisis partiendo del

torque del motor. El torque del motor a la salida es de $1.128 Nm$ a $117.7 rpm$ [1] con una caja reductora SSG18 marca Namiki y una relación de 80:1. La fuerza se determinó por medio de la ecuación 1.

$$\tau = F_{mc} \left(\frac{d}{2} \right) \quad (1)$$

Obteniendo una fuerza de $451.2 N$ con un $d = 5mm$, donde d es el diámetro del tornillo. La transferencia de fuerza y movimiento será realizada por un tornillo sinfín, este elemento proporciona una fuerza F_m completamente vertical, por lo tanto es necesario saber cuánta fuerza otorga el motor por medio del tornillo sinfín. Los parámetros de diseño para el tornillo son: paso del tornillo $d_r = 1.5mm$ y un diámetro $d = 5mm$ como se observa en la figura 2 [2].

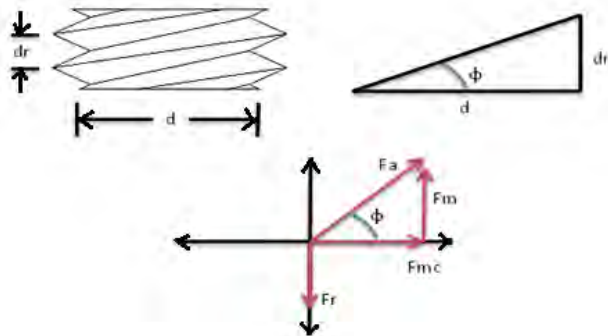


Figura 2. Descripción de fuerzas del tornillo sinfín

Inicialmente se calcula el ángulo φ por medio del diámetro y el paso del tornillo, según la ecuación 2.

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{d_r}{d} \right) = 16.6^\circ \quad (2)$$

Ahora, este sistema está compuesto de tres fuerzas: fuerza del motor F_{mc} , fuerza del tornillo F_a y la fuerza de rozamiento F_r , la fuerza que utiliza el *gripper* es F_m o la componente vertical. De esta forma se determina la fuerza por medio de la ecuación 3.

$$F_m = F_{mc} \tan \varphi - F_r \quad (3)$$

Para una situación ideal la fuerza de rozamiento es igual a cero ($F_r = 0$), por lo tanto, la fuerza transferida es de $135.4N$.

Para el análisis de las fuerzas actuantes en el mecanismo de cuatro barras se realiza un diagrama de fuerzas para cada articulación. La fuerza ejercida por el motor DC al mecanismo se denomina F_m y se divide en dos fuerzas, ya que el mecanismo es simétrico.

La dirección de la fuerza se muestra en la Figura 3, de esta forma la pieza 2 siempre tendrá un movimiento vertical, que al acoplarse con la pieza cuatro transmitirá una fuerza por medio de la articulación, que se representa en la ecuación 4.

$$F_1 = \frac{F_p}{\cos \theta} \quad (4)$$

La fuerza horizontal que es transferida de la pieza cuatro a la pieza tres se muestra en la ecuación 5. En esta articulación se observa que la fuerza sobre la pieza no solo depende del motor DC, sino también del ángulo en la pieza tres.

$$F_p = \frac{F_m}{2} \cos \theta \quad (5)$$

La pieza tres siempre será la pieza final para poder sujetar algún objeto, la ecuación 5 muestra el cálculo de la fuerza horizontal que es transmitida a esta pieza, pero esta fuerza no será la final, ya que la fuerza ejercida en la pieza tres se encuentra a una distancia diferente a la fuerza con que se sujetan las botellas. Para calcularlo se aplica la tercera ley de Newton, de la cual se puede decir que la suma de los momentos en la pieza tres es igual a cero y se representa en la ecuación 6. Reemplazando esta ecuación, cada momento por la fuerza aplicada y su respectivo desplazamiento, se obtiene la ecuación 7.

$$M_p = -M_t \quad (6)$$

$$F_p d_p = -F_t d_t \quad (7)$$

Teniendo en cuenta el diagrama de fuerzas representado en la Figura 3, la fuerza de sujeción que ejerce el *gripper* partiendo desde la fuerza aplicada del motor se obtiene la ecuación 8.

$$F_t = \frac{F_m d_p \cos \theta}{2 d_t} \quad (8)$$

Conociendo esta fuerza y utilizando todos los parámetros de diseño del *gripper*, podemos calcular la fuerza final con que el *gripper* sujeta la botella usando la ecuación 8. La fuerza final de sujeción es de $11.7398N$ o $1.198Kgf$, esto para situaciones ideales.

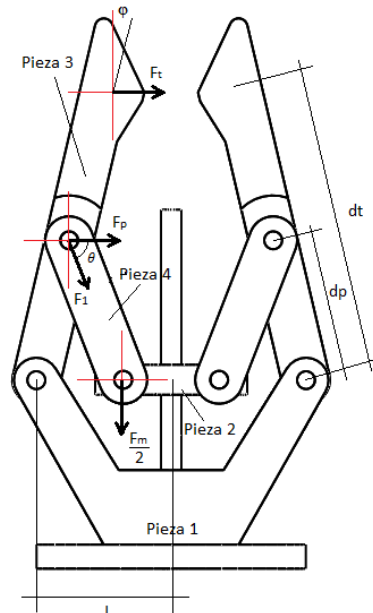


Figura 3. Diagrama de fuerzas del *gripper*.

Con base a todo lo anterior, el sistema presenta un comportamiento no lineal al momento de transmitir la fuerza desde el motor hasta la pieza de sujeción de objetos, como se muestra en la figura 4 [3-9].

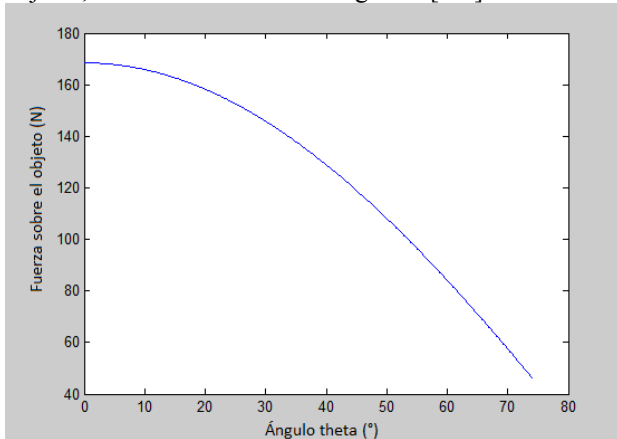


Figura 4. Comportamiento de fuerza del *gripper*.

Para poder implementar este mecanismo de sujeción de objetos es necesario dar dimensiones a todas las piezas y utilizar un programa de diseño de piezas 3D, para este trabajo es utilizado el *software* de diseño SolidWorks® y en la Figura 5 se observa el diseño final del *gripper*.

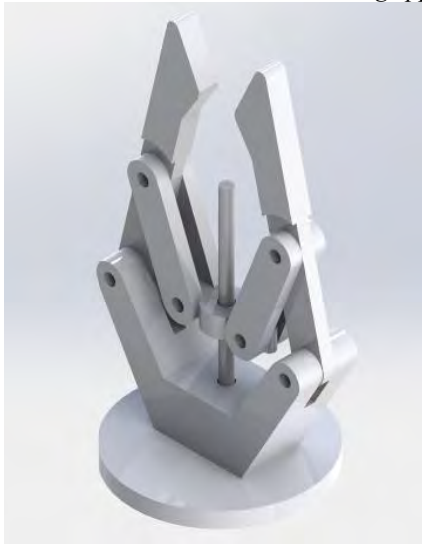


Figura 5. Diseño en SolidWorks del *gripper*.

3. OPTIMIZACIÓN MECÁNICA

La optimización mecánica se utiliza para minimizar los recursos, pero a su vez maximizando de alguna forma su robustez. Esto se puede llevar a cabo utilizando algún método de optimización simple, pero eficaz.

Para este caso se aplica el método denominado Evolución Diferencial [10, 11]. Este método o algoritmo se encuentra en la categoría de métodos heurísticos para la solución de problemas de optimización lineales y no lineales. Este método se basa en la evolución computacional, el cual emplea durante un determinado número de iteraciones una serie de generaciones

compuestas por padres que se recombinan aleatoriamente teniendo en cuenta penalizaciones, creando nuevos hijos para la siguiente generación y descartando los hijos menos aptos. Así, de esta forma en cada iteración habrá una nueva generación hasta un criterio de parada. Como criterio de parada se utiliza la diferencia entre cada individuo en la generación siguiente, ya que si la diferencia es mínima se detendrá el algoritmo, obteniendo una generación óptima en la cual se puede encontrar una buena solución para la función objetivo.

Pseudocódigo ED

Empezar

- Generar aleatoriamente una población inicial de vectores.
- Calcular la aptitud de la población inicial.
- Repetir.
 - Por cada target, seleccionar tres vectores aleatoriamente (selección de padres).
 - Crear un trial usando los operadores de la ED (mutación).
 - Si el trial es mejor que el target el trial tomará el lugar del target (reemplazo).
- Hasta que se satisfaga una condición de paro.

Fin

Para este caso de estudio es necesario optimizar el sistema mecánico para maximizar la fuerza que aplica el motor DC al momento de transferir la fuerza y movimiento a la pieza que sujeta las botellas. La forma en que se aplica el método de Evolución Diferencial es utilizando como función objetivo $F_t(\theta)$ en la ecuación 9, la cual describe el comportamiento dinámico del *gripper*. Ahora, la variable que se optimiza es la longitud de la pieza cuatro, esto se realiza por medio de los ángulos φ y θ como se muestra en la ecuación 10, donde L es la longitud de centro del tornillo sinfín hasta el acople de la pieza uno con la tres. También, para ejecutar este algoritmo es necesario acotar las variables φ y θ a optimizar, por tanto se siguen las siguientes cotas, $0 \leq \theta \leq 74.16^\circ$ y $-26^\circ \leq \varphi \leq 18.64^\circ$.

$$f(x) = \max_{F_m} F_t(\theta) \quad (9)$$

$$L_{Pieza\ 4} = \frac{L - d_p \sin(\varphi)}{\cos(\theta)} \quad (10)$$

Después de haber implementado este algoritmo en MATLAB® el resultados obtenido a partir de la estructura definida es que la longitud de la pieza cuatro más óptima es de 53.7 mm. Con este resultado se generaron los planos de todas las piezas y son llevados a un centro de mecanizado donde se fabrican todas las piezas. Se utilizaron las instalaciones del laboratorio de mecánica de la Universidad Central para la fabricación del *gripper* y se instaló en un manipulador como se muestra en la figura 6.

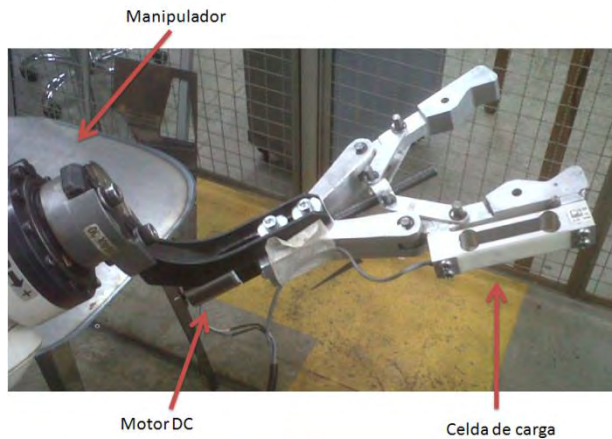


Figura 6. Implementación del *gripper* en un manipulador.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Observando y evaluando la función objetivo se confirmaron los resultados experimentales obtenidos, los cuales arrojaron que entre más cerrado se encuentre el *gripper* será mayor la fuerza que se aplica en el agarre de la botella, independiente de la fuerza aplicada en el motor, esto es debido a que el ángulo φ y θ tienden a 90° o su máximo valor.

La sujeción de los objetos presenta una fuerza más constante a lo largo del desplazamiento de la tuerca en el tornillo sinfín.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Namiki SSG18. Namiki Precision Jewel. URL: www.namiki.net.
- [2] Russell C. Hibbeler, *Mecánica vectorial para ingenieros: estática*, Pearson (2004).
- [3] Rosidah Sam; Samia Nefti, *Design and Development of Flexible Robotic Gripper for Handling Food Products*, IEEE. 2008.
- [4] Kyoung-Taik Park; Young-Jae Shin; Chan-Hun Park, *Robot Application for Assembly Process of Engine Part*. 2008.
- [5] Philippe Gorce; Claude Villard; Jean Guy Fontaine; Philippe Coiffet; Jacques Rabbit, *A new solution to design polyvalent gripper systems for industrial applications*, IEEE. 1994.
- [6] Anthony Remazeilles, *Automatic Grasping Task with a Catadioptric Sensor for Disabled People*. 2008.
- [7] Ying J. Huang; Yuan Z. Chen, Tzu C; Hong S. Yu, *Design and Implementation of a Multi-Functional Mobile Robot*. 2009.
- [8] Dalibor Petković, Shahaboddin Shamshirband, Javed Iqbal, Nor Badrul Anuar, Nenad D. Pavlović, Miss Laiha Mat Kiah, Adaptive neuro-fuzzy prediction of grasping object weight for passively compliant gripper, *Applied Soft Computing*, Volume 22, September 2014, Pages 424-431, ISSN 1568-4946, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2014.04.037>.

- [9] V. Galabov, Ya. Stoyanova, G. Slavov, Synthesis of an adaptive gripper, *Applied Mathematical Modelling*, Volume 38, Issue 13, 1 July 2014, Pages 3175-3181, ISSN. 0307-904X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2013.11.038>.
- [10] Zhao Yang Dong; Miao Lu; Zhe Lu; Kit Po Wong, *A Differential Evolution Based Method for Power System Planning*, *Evolutionary Computation*, 2006. CEC 2006. IEEE Congress on, vol., no., pp.2699-2706, 0-0 0. Doi: 10.1109/CEC.2006.1688646.
- [11] Guang Ya Yang; Zhao Yang Dong; Kit Po Wong; , *A Modified Differential Evolution Algorithm With Fitness Sharing for Power System Planning*, *Power Systems*, IEEE Transactions on , vol.23, no.2, pp.514-522, May 2008. Doi: 10.1109/TPWRS.2008.919420

ESQUEMA DISCRETO DE CONTROL DE POSICIÓN PARA TELEOPERACIÓN DE UN MANIPULADOR MÓVIL

Discrete regulation control scheme for teleoperated mobile manipulator

RESUMEN

En el Laboratorio de Mecatrónica del Cidetec del IPN se ha diseñado y construido un manipulador móvil, el cual es operado remotamente por medio de un *gamepad*, en este trabajo se presenta una estrategia de control en tiempo discreto, aplicado al problema de regulación de la plataforma móvil, que es un robot tipo (2,0) con locomoción diferencial. El algoritmo de control se va a implementar en un sistema embebido instalado en la propia plataforma móvil, por esta razón se desarrolló una ley de control discreta de estructura variable a partir del modelo cinemático en tiempo discreto del móvil. Esta ley permite ubicar al prototipo en una posición específica, para la operación del brazo, indicada por el operador remoto del sistema. El algoritmo de control se implementa en un dispositivo digital, por lo que su diseño en tiempo discreto permite una mejora en el rendimiento computacional del sistema, dado que no hay necesidad de utilizar un período de discretización específico.

Palabras clave: control discreto, modelo discreto exacto, regulación, robot móvil.

NOEMÍ HERNÁNDEZ-OLIVA

Ingeniera en Control y Automatización,
alumno M. Sc.
Instituto Politécnico Nacional
Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Computo
nhernandez@ipn.mx

PAOLA A. NIÑO-SUÁREZ

Doctor en Ciencias en Mecatrónica
Profesor investigador
Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Azcapotzalco
pninos@ipn.mx

ABSTRACT

In this paper is presented a novel strategy for a discrete time control, applied to the regulation problem of a (2,0) type mobile robot. This strategy is implemented on a mobile manipulator designed and built by the CIDETEC-IPN Mechatronics Lab. Since the robot has an embedded system for controlling both its displacement as the manipulator's actuation, the control law of variable structure was developed from the kinematic model of the mobile robot posture in discrete time. This law permits to set the prototype in a specific position for arm operation. The control algorithm is implemented in a digital system, so the interest is on its design in discrete time, allowing improvement in the system performance because there is no need to discretize a specific period of the implemented control law.

Keywords: discrete control, exact discrete model, mobile robot, regulation.

ÉDGAR A. PORTILLA-FLORES

Doctor en Ciencias en Mecatrónica
Profesor investigador
Instituto Politécnico Nacional
Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Computo
aportilla@ipn.mx

1. INTRODUCCIÓN

La diversidad de aplicaciones de los robots manipuladores móviles, tales como la exploración espacial, la exploración en ambientes peligrosos, la vigilancia y la seguridad, la realización de tareas peligrosas o repetitivas, por citar algunas, ha llevado a que uno de los problemas actuales dentro de la robótica móvil de gran interés, sea la regulación o control de posición de móviles.

En el Laboratorio de Mecatrónica del Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Computo (Cidetec), del Instituto Politécnico Nacional en México, se ha venido trabajando desde hace dos años en el diseño e implementación de un manipulador móvil, compuesto por un brazo de tres grados de libertad y una plataforma móvil de tipo (2,0), con locomoción diferencial cuyo diseño y construcción se presentó en [1]. El robot es

operado a distancia utilizando un control remoto en forma de *gamepad*, conectado a una computadora

portátil, desde el *gamepad* el operador se encarga de enviar la posición a la cual deben llegar el móvil y su brazo. Esta información es enviada mediante una red inalámbrica que enlaza el computador portátil con un sistema embebido embarcado en la plataforma móvil, por conexión wi-fi. El sistema embebido se encarga de calcular la ley de control que dirigirá los movimientos de los diferentes actuadores, tanto del brazo como de la plataforma, para que el manipulador móvil alcance la posición solicitada.

En diversos desarrollos de la literatura actual se han propuesto alternativas de solución al problema de regulación en los robots móviles, la mayoría de ellos utiliza el modelo continuo, son escasos aquellos trabajos que utilizan el modelo discreto. La motivación de este trabajo es calcular una ley de control que permita al

manipulador móvil posicionarse a partir de un valor deseado, pero utilizando el modelo discreto del robot, inicialmente de la plataforma móvil y posteriormente del brazo articulado. De esta forma se logrará obtener el mayor beneficio al calcular, en un sistema embebido, el algoritmo de control discreto desarrollado, así se mejorará el desempeño computacional del sistema y será más eficiente al momento de ejecutarlo, en comparación con la implementación de un algoritmo en tiempo continuo.

A continuación se presentan algunos de los trabajos más relevantes consultados durante la realización de este trabajo.

En [2] se muestra un análisis de diferentes enfoques con los cuales se puede resolver el problema de navegación y regulación en robots móviles, cuando estos ejecutan alguna tarea con la presencia de obstáculos conocidos; sin embargo en estos enfoques el robot móvil no es capaz de parar en una posición arbitraria. En [3] se presenta un análisis a partir del modelo discreto de un robot móvil tipo (2,0) con retardo de transporte, el cual ha servido de referencia para la propuesta del algoritmo de control aquí presentado. En [4] se propone un algoritmo de control discreto para un robot móvil con ruedas (WMR), a través del diseño crítico adaptativo avanzado (*Adaptive Critic Design, ACD*), utilizando métodos de programación heurística; a partir del modelo dinámico del robot, se propone el diseño de un controlador PD y un término de supervisión dado por el teorema de estabilidad de Lyapunov, este algoritmo se prueba en un robot Pioneer 2-DX, logrando una buena adaptación y convergencia durante el proceso. En [5], a partir del modelo dinámico del robot móvil y con la ayuda de una cámara instalada en el mismo, se propuso una ley de control que utiliza esta información, basándose en la dinámica del control en lazo cerrado.

La organización del artículo es la siguiente: los modelos en tiempo continuo y discreto exacto para el robot móvil tipo (2,0) se presentan en la Sección 2; la ley de control propuesta para regulación se desarrolla en la sección 3. En la sección 4 se exponen los resultados de las simulaciones numéricas, así como una discusión de los mismos. Finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones del presente trabajo.

2. MODELO DISCRETO

En diversos desarrollos de controladores para regulación se utilizan modelos en tiempo continuo, sin considerar que se implementarán en sistemas cuya base de tiempo es discreta. En el presente trabajo, para obtener el algoritmo de control discreto que se implementará en un dispositivo digital, se utilizó el modelo discreto exacto obtenido a partir de la cinemática continua para la postura de un robot móvil del tipo (2,0), como el que se presenta en la figura.1. Para comprender el modelo discreto es

necesario primero analizar el modelo continuo, las variables x_1 , x_2 representan las coordenadas del centro de rotación del robot respecto a los ejes de referencia X_1 y X_2 , y la variable x_3 , corresponde al ángulo formado por el cuerpo del robot con respecto al eje de referencia X_1 . Ahora u_1 y u_2 son las velocidades lineal y angular respectivamente del robot, al considerarlo como un cuerpo sólido, siendo las entradas de control del sistema.

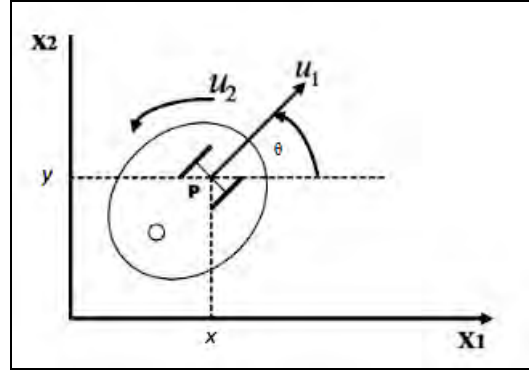


Figura 1. Diagrama esquemático de un robot móvil tipo (2,0).

El modelo cinemático continuo está dado por:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= u_1(t) \cos x_3(t) \\ \dot{y}(t) &= u_1(t) \sin x_3(t) \\ \dot{\theta}(t) &= u_2(t)\end{aligned}\quad (1)$$

A partir del modelo continuo, en [6] se obtuvo el modelo discreto exacto, que se presenta a continuación:

$$\begin{aligned}\dot{x}(kT + T) &= u_1(kT) + 2u_1(kT)\psi \cos\left(x_3(kT) + \frac{T}{2}u_2(kT)\right) \\ \dot{y}(kT + T) &= u_1(kT) + 2u_1(kT)\psi \sin\left(x_3(kT) + \frac{T}{2}u_2(kT)\right) \\ \dot{\theta}(kT + T) &= x_3(kT) + Tu_2(kT)\end{aligned}\quad (2)$$

definiendo la función ψ como:

$$\psi[u_2(kT)] = \begin{cases} \frac{\sin(\frac{T}{2}u_2(kT))}{u_2(kT)} & \text{si } u_2(kT) \neq 0 \\ \frac{T}{2} & \text{si } u_2(kT) = 0 \end{cases}$$

Con el fin de simplificar la notación que se utilizará en el artículo se realizó el siguiente cambio de variables:

$$\begin{aligned}x^+ &= x(kT + T) \\ x &= x(kT)\end{aligned}$$

3. CONTROL PROPUESTO

A partir del modelo presentado en (2), se propone una ley de control de estructura variable que permite resolver el problema de regulación del robot de acuerdo con su orientación inicial. El algoritmo de control busca

estabilizar inicialmente dos de los tres estados del modelo, y cuando estos convergen al valor deseado la ley de control conmuta para que el tercer estado pueda converger también a su valor deseado; de esta forma el robot llega a la posición indicada por el operador.

Se evaluó el ángulo inicial del robot para determinar cuál era la orientación más adecuada para que el móvil se aproxime al valor deseado, sin violar las restricciones no holónomas del modelo. La orientación del robot móvil está dada por el estado x_3 ; si la dirección inicial es un ángulo mayor o igual a 45° ($\pi/4$), se considera una primera estructura de control que busca que el robot llegue a la posición deseada con un ángulo de 0° , aproximándose primero al eje X_1 , y posteriormente llegando al valor deseado aproximándose al eje X_2 . Si el ángulo inicial es menor a 45° ($\pi/4$), se considera una segunda estructura de control, que llevará al móvil a la posición deseada con un ángulo de orientación igual a 90° ($\pi/2$), aproximándose primero al eje X_2 . A continuación se presenta el cálculo de las dos estructuras de control.

3.1 Ley de control para $x_{3\text{inicial}} \geq \pi/4$ con una orientación final dada por $x_{3d} = 0$.

Para el primer caso, se busca que el robot se acerque a la posición deseada sobre el eje X_1 , buscando una orientación final dada por $x_3=0$. Para lograrlo, se plantea una nueva entrada de control para x_3 dada por,

$$v_3 = x_{3d}^+ + k_3(x_3 - x_{3d}) \quad (3)$$

$$\text{si } x_{3d} = 0 \Rightarrow x_{3d}^+ = 0$$

reemplazando en (3) se tiene,

$$v_3 = k_3 x_3$$

tomando x_3^+ de (2), se desea que en lazo cerrado con la ley de control dada en (3), el sistema sea de la forma,

$$x_3^+ = v_3 \quad (4)$$

donde reemplazando se observa que,

$$x_3(kT) + Tu_2(kT) = k_3 x_3 \quad (5)$$

A partir de (5) se obtiene entonces la ley de control u_2 , que logrará que $x_3^+ = v_3$,

$$u_2 = \frac{(k_3 - 1)x_3}{T} \quad (6)$$

Ahora, aplicando el valor obtenido de u_2 a la ecuación de estado de x_2^+ de (2) se tiene que,

$$x_2^+ = x_2 + 2u_1 \psi \sin\left(x_3 + \frac{T}{2}u_2\right)$$

$$x_2^+ = x_2 + 2u_1 \psi \sin\left(x_3 + \frac{T}{2}\left[(k_3 - 1)x_3\right]\right) \quad (7)$$

$$x_2^+ = x_2 + 2u_1 \psi \sin\left(x_3 + \frac{1}{2}\left[(k_3 - 1)x_3\right]\right)$$

Dado que se busca que x_2 converja al valor deseado, es necesario planear una nueva ley de control v_2 dada por:

$$v_2 = x_{2d}^+ + k_2(x_2 - x_{2d}) \quad (8)$$

$$\text{Si } x_{2d} = 0 \Rightarrow x_{2d}^+ = 0$$

sustituyendo en (8) se tiene que,

$$v_2 = k_2 x_2$$

tomando x_2^+ de (7), se desea que en lazo cerrado con la ley de control dada en (8), el sistema sea de la forma,

$$v_2 = x_2^+$$

reemplazando, se observa que,

$$k_2 x_2 = x_2 + 2u_1 \psi \sin\left(x_3 + \frac{T}{2}u_2\right)$$

de donde se obtiene la ley de control para u_1 ,

$$u_1 = \frac{x_2(k_2 - 1)}{2\psi \sin\left(x_3 + \left[\frac{(k_3 - 1)x_3}{2}\right]\right)} \quad (10)$$

Con las leyes de control obtenidas en (6) y (10) se asegura que x_3 y x_2 convergen a la posición deseada, pero no se tiene control sobre la posición de x_1 , por lo cual es necesario calcular una nueva ley de control para u_1 que comenzará a actuar sobre el sistema sólo cuando x_3 y x_2 converjan al valor deseado; al conmutar el control a u_1 entonces x_1 convergerá también al valor deseado.

La forma de obtener u_1 es sustituir u_2 dado en (6) en la ecuación de estado para x_1^+ de (2),

$$x_1^+ = x_1 + 2u_1 \psi \cos\left(x_3 + \frac{T}{2}u_2\right)$$

$$x_1^+ = x_1 + 2u_1 \psi \cos\left(x_3 + \frac{T}{2}\left[(k_3 - 1)x_3\right]\right) \quad (11)$$

$$x_1^+ = x_1 + 2u_1 \psi \cos\left(x_3 + \left[\frac{(k_3 - 1)x_3}{T}\right]\right)$$

luego se plantea una ley de control V_1 para lograr que x_1 converja a la posición deseada,

$$v_1 = x_{1d}^+ + k_1(x_1 - x_{1d})$$

si $x_{1d} = 0$ entonces $x_{1d}^+ = 0$

reemplazando se tiene que,

$$v_1 = k_1 x_1 \quad (12)$$

tomando x_1^+ de (11), se desea que en lazo cerrado con la ley de control dada en (12), el sistema sea de la forma,

$$x_1^+ = v_1$$

reemplazando se tiene

$$k_1 x_1 = x_1 + 2u_1 \psi \cos\left(x_3 + \frac{T}{2}u_2\right) \quad (13)$$

de (13) se obtiene la ley de control para u_1' , con la cual x_1 también convergerá al valor deseado.

$$u_1 = \frac{x_1(k_1 - 1)}{2\psi \cos\left(x_3 + \left[\frac{(k_3 - 1)}{2}\right]\right)} \quad (14)$$

3.2 Ley de control para $X_{3\text{INICIAL}} < \pi/4$, con una orientación final dada por $X_{3D} = \pi/2$

Para la segunda estructura de control, se busca que el robot se acerque a la posición deseada aproximándose primero al eje X_2 , de manera que tenga una orientación final dada por $x_3 = \pi/2$. Para ello se plantea una entrada de control para x_3 dada por:

$$v_3 = x_{3d}^+ + k_3(x_3 - x_{3d}) \quad (15)$$

$$\text{Si } x_{3d} = \frac{\pi}{2} \Rightarrow x_{3d}^+ = \frac{\pi}{2}$$

$$v_3 = \frac{\pi}{2} + k_3\left(x_3 - \frac{\pi}{2}\right) \quad (16)$$

en lazo cerrado se desea obtener,

$$x_3^+ = v_3$$

dado que,

$$x_3^+ = x_3 + Tu_2$$

sustituyendo para x_3^+ dado en (2) se tiene,

$$\frac{\pi}{2} + k_3\left(x_3 - \frac{\pi}{2}\right) = x_3 + Tu_2$$

de donde se obtiene la ley de control para u_2 ,

$$u_2 = \frac{\frac{\pi}{2} + k_3x_3 - k_3\frac{\pi}{2} - x_3}{T} \quad (17)$$

De igual forma que en el caso anterior, aplicando el valor obtenido de u_2 en (17) a x_1^+ dada en (2) se tiene que,

$$x_1^+ = x_1 + Tu_2$$

$$x_1^+ = x_1 + T\left(\frac{\frac{\pi}{2} + k_1x_1 - k_1\frac{\pi}{2} - x_1}{T}\right) \quad (18)$$

$$x_1^+ = k_1\left(x_1 - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{\pi}{2}$$

para que x_1 converja al valor deseado, se plantea una nueva ley de control V_1 dada por,

$$v_1 = x_{1d}^+ + k_1(x_1 - x_{1d}) \quad (19)$$

$$\text{Si } x_{1d} = \frac{\pi}{2} \Rightarrow x_{1d}^+ = \frac{\pi}{2}$$

reemplazando se tiene,

Se quiere $v_1 = \frac{\pi}{2} + k_1\left(x_1 - \frac{\pi}{2}\right)$ que en lazo cerrado (18) con (19), el sistema este dado por,

sustituyendo, $v_1 = x_1^+$

$$\frac{\pi}{2} + k_1\left(x_1 - \frac{\pi}{2}\right) = x_1 + 2u_1\psi \sin\left(\frac{1}{2}\left[x_3(1+k_3) + \frac{\pi}{2}(1-k_3)\right]\right)$$

se encuentra que la ley de control obtenida es:

$$u_1 = \frac{\frac{\pi}{2} + k_2\left(x_2 - \frac{\pi}{2}\right) - x_2}{2\psi \sin\left(\frac{1}{2}\left[x_3(1+k_3) + \frac{\pi}{2}(1-k_3)\right]\right)} \quad (20)$$

Ahora los estados x_3 y x_1 convergen a la posición deseada, pero no se tiene control sobre la posición de x_2 , por lo cual es necesario nuevamente calcular una nueva ley de control u_1' que logre que x_1 converja a la posición deseada.

Reemplazando la u_2 obtenida en (6), en x_2^+ , dada en (2) se obtiene

$$x_2^+ = x_2 + 2u_1\psi \cos\left(x_3 + \frac{T}{2}u_2\right)$$

$$x_2^+ = x_2 + 2u_1\psi \cos\left(x_3 + \frac{\pi}{2}\left[\frac{\pi}{2} + k_3x_3 - k_3\frac{\pi}{2} - x_3\right]\right) \quad (21)$$

$$x_2^+ = x_2 + 2u_1\psi \cos\left(\frac{1}{2}\left[x_3(1+k_3) + \frac{\pi}{2}(1-k_3)\right]\right)$$

Entonces para que x_2 converja se plantea una nueva ley de control v_2 de la forma:

$$v_2 = x_{2d}^+ + k_2(x_2 - x_{2d})$$

$$\text{Si } x_{2d} = \frac{\pi}{2} \Rightarrow x_{2d}^+ = \frac{\pi}{2}$$

entonces

$$v_2 = \frac{\pi}{2} + k_2\left(x_2 - \frac{\pi}{2}\right)$$

Así, el sistema en lazo cerrado formado por (20) y (21) está dado por

$$v_2 = x_2^+$$

$$\frac{\pi}{2} + k_2\left(x_2 - \frac{\pi}{2}\right) = x_2 + 2u_1\psi \cos\left(\frac{1}{2}\left[x_3(1+k_3) + \frac{\pi}{2}(1-k_3)\right]\right) \quad (22)$$

de donde se obtiene la ley de control u_1' que se necesita para lograr que cuando x_2 y x_3 converjan al valor deseado, también x_1 converja,

$$u_1' = \frac{\frac{\pi}{2} + k_2\left(x_2 - \frac{\pi}{2}\right) - x_2}{2\psi \cos\left(\frac{1}{2}\left[x_3(1+k_3) + \frac{\pi}{2}(1-k_3)\right]\right)} \quad (23)$$

3.3 Cálculo de la velocidad diferencial del móvil

Es necesario recordar que u_1 es la velocidad lineal y u_2 es la velocidad angular del robot, al considerarlo como un cuerpo sólido. De tal forma que, para la implementación física del sistema, a partir del algoritmo de control calculado es necesario calcular la velocidad de la rueda izquierda y de la rueda derecha de la plataforma móvil, con los datos de las señales de control u_1 y u_2 , mediante la matriz de transformación de velocidades T ,

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} w_d \\ w_i \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r/2 & r/2 \\ r/2l & -r/2l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_d \\ w_i \end{bmatrix}$$

donde:

T = matriz de transformación de velocidades.

u_1 = velocidad lineal del vehículo.

u_2 = velocidad angular del vehículo.

w_d = velocidad de giro de la rueda derecha.

w_i = velocidad de giro de la rueda izquierda.

r = radio nominal de cada rueda.

$$\begin{bmatrix} w_d \\ w_i \end{bmatrix} = [T^{-1}] \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

con los valores de control u_1 y u_2 obtenidos se calculan directamente sobre el sistema embebido las velocidades de giro dadas en (23) y se envían estos perfiles de velocidad a la plataforma móvil del robot, para lograr posicionarlo en el lugar deseado antes de operar el brazo. Estas velocidades fueron consideradas en los experimentos por simulación, para conocer la demanda real que tendría cada uno de los actuadores del robot y realizar una adecuada selección de los mismos.

De esta manera, se desarrolló un algoritmo de control discreto, de estructura variable que opera de acuerdo a las condiciones iniciales de orientación del robot, para encontrar la mejor trayectoria que garantice que no se violan las restricciones no holónomas del móvil.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se realizaron varios experimentos para diferentes valores de ángulos, se presentan los resultados para dos de los casos mencionados. Para el primer caso se consideró un ángulo de orientación del robot de $x_3=4.60 \text{ rad}$ (264.7°); en la Fig. 2 puede observarse la trayectoria que siguió el robot iniciando a una distancia dada por (3,4) y llegando a la posición 0, con una orientación mayor a $\pi/4$.

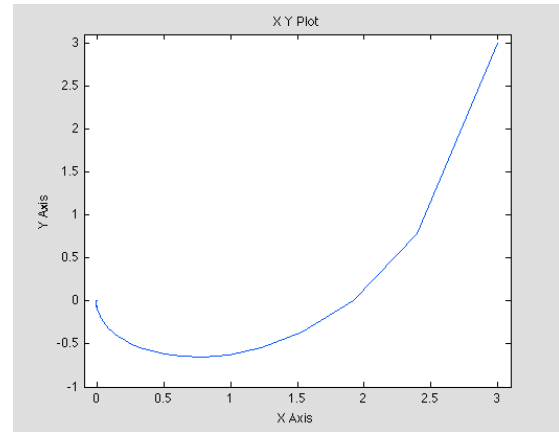


Figura 2. Trayectoria del robot con un ángulo mayor a $\pi/4$.

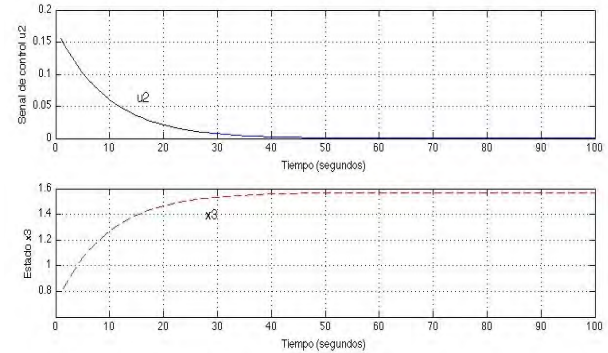


Figura 3. Resultados de la simulación u_2 y x_3 con un ángulo mayor a $\pi/4$.

En las figura 3 se observa que u_2 logra que x_3 converja a cero y cuando u_1 conmuta, u_2 cambia ligeramente también, logrando mantener a x_3 en el valor deseado. En la figura 4, se observa que cuando los estados x_1 y x_3 convergen a cero la ley de control u_1 conmuta para garantizar que el robot se desplace al punto deseado, llevando x_2 a la posición requerida.

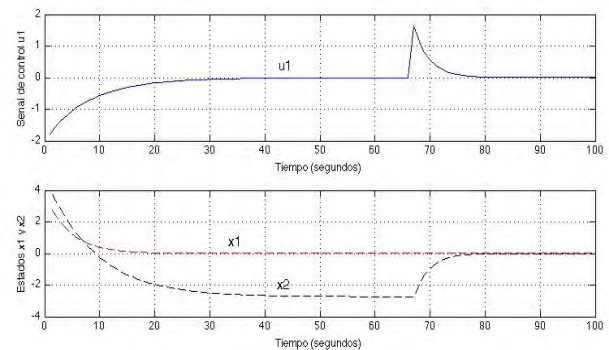


Figura 4. Resultados de la simulación para el control u_1 y los estados x_1 y x_2 con un ángulo mayor a $\pi/4$.

Para el segundo caso, se consideró un ángulo menor a $\pi/4$, $x_3=0.15 \text{ rad}$ (8.59°); para un valor inicial de $x_1=3$ y $x_2=4$, la trayectoria obtenida puede observarse en la figura 5.

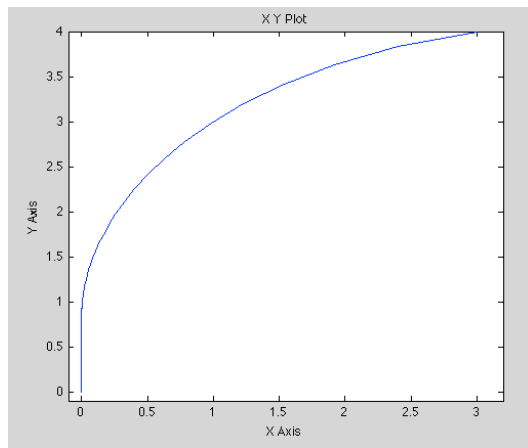


Figura 5. Trayectoria del robot con ángulo menor a $\pi/4$.

En la figura 6 se observa cómo u_2 logra que la posición x_3 alcance el valor deseado y como lo mantiene en ese valor cuando u_1 conmuta. En la figura 7 se puede observar que cuando ambos estados convergen al valor deseado, x_1 y x_3 , la ley de control u_1 conmuta, llevando también a x_2 al valor deseado.

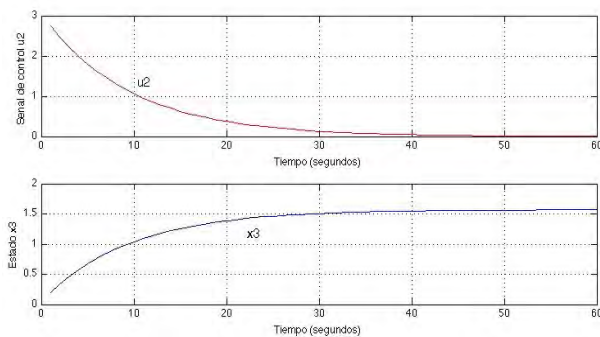


Figura 6. Resultados de la simulación para las entradas de control u_2 con un ángulo menor a $\pi/4$.

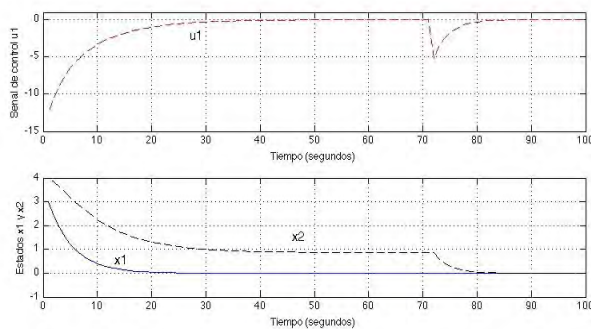


Figura 7. Resultados de la simulación para los estados x_1 y x_2 con un ángulo menor a $\pi/4$.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta el desarrollo de un algoritmo de control el cual será implementado en un sistema embebido instalado en un manipulador móvil teleoperado, para obtener las leyes de control se utilizó el modelo discreto exacto y se obtuvo un control conmutado en tiempo discreto. Un control discreto ofrece mayores

facilidades a la hora de su programación en un dispositivo digital; tiene como principal ventaja que el cálculo del algoritmo no está limitado por una frecuencia de muestreo, y por lo tanto se puede implementar en una gran variedad de sistemas. Con un control en tiempo discreto se puede mejorar el tiempo de cálculo del algoritmo, por lo que pueden disminuirse los efectos de los tiempos de retardo en la transmisión de la información de la posición deseada, enviada por el operador remoto. A través del programa desarrollado en el sistema embebido, embarcado en el móvil, se obtienen, procesan y calculan las señales de control de los actuadores del móvil.

Por otra parte, como trabajo futuro se prevé la implementación de cámaras en el robot, que permitan resolver el problema de regulación visual y cuya información también sea procesada en el sistema embebido, por medio de módulos adicionales de programación.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. F. Sánchez, P. A. Niño, E. A. Portilla, O. F. Avilés y G. Villegas, "Manipulador móvil para rescate y operación" en XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, CIBIM 2013, Lima, Perú, Octubre 23 -26, 2012.
- [2] Z. Wang, Y. Liu, B. Cail and J. Zhao. "Planar Region Alignment based Visual Regulation for Mobile Robot". En Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Chengdu, China, agosto 5 - 8, pp. 1978-1983.
- [3] J. Chen, W. Dixon, D. Dawson and T. Galluzzo. "Navigation and Control of a Wheeled Mobile Robot". En Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Monterey, California, USA, 24-28 julio 2005, pp. 1145-1150.
- [4] Z. Hendzel and M. Szuster. "Discrete neural dynamic programming in wheeled mobile robot control". Commun Nonlinear Sci Numer Simulat 16, 2011, pp. 2355-2362.
- [5] P. A. Niño Suárez, E. Aranda Bricaire and M. Velasco Villa. "Discrete-Time stabilization problem of a mobile robot subject to network induced delay". In ISRA 5th International Symposium on Robotics and Automation. ISBN: 970-769-070-4 Hidalgo, México, agosto 25-28, 2006.
- [6] R. Orosco G., "Modelado, análisis y control de vehículos articulados y robots móviles. Teoría y experimentos". Ph.D. Dissertation. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, octubre 2003.

DEVELOPMENT OF AN ELECTRIC WHEELCHAIR WITH INFANT CAR SEAT FOR CHILDREN BETWEEN FIVE AND TEN YEARS OF AGE USING WIRELESS CONTROL

Development of an electric wheelchair with infant car seat for children between five and ten years of age using Wireless control

ABSTRACT

Assistive technology (AT) is still a new term used to identify the entire arsenal of resources and services that contribute to provide or expand functional abilities of people with disabilities. AT services are usually trans involving professionals from various fields, such as physical therapy, medicine, engineering and so on. This paper presents the project of a wheelchair with two engines brushed DC. According to on the mounted structure, this wheelchair has two front wheels and two caster wheels rear that supports up to 100 kg for a children. The wheelchair has a seat infant of child which is used in passenger cars. The main objective it's development an alternative form of controller mainly for assistant children's with disability. Furthermore, the control will be done remotely, and it became necessary a speed controller for two engines and purchased a radio control, microcontroller and ultrasonic sensor.

Keywords: Assistive technology, Disability, Wheelchair

CÉSAR QUIROZ

Mechatronics Engineer.
Master of student
State University at Campinas - UNICAMP
cesar@fem.unicamp.br

DARLA ARAÚJO

Mechatronics Engineer.
Master of student
State University at Campinas - UNICAMP
darla@fem.unicamp.br

ANTONIO ARRUDA

Mechanical Engineer, PhD.
Profesor Titular
State University at Campinas - UNICAMP.
celso@fem.unicamp.br

1. INTRODUCTION

Assistive Technology (AT) has several definitions; however, for the purpose this paper it can be described as '... any item, piece of equipment or product system whether acquired commercially off the shelf, modified or customized that is used to increase, maintain or improve functional capabilities of children with disabilities'¹. It therefore covers a wide range of equipment from walking sticks to a voice output communication aid (VOCA), a shower chair to a complex environmental control system [8]. Benefits and purpose of AT are in many respect self-evident in that it provides a gateway to the independence, dignity and self-esteem of some 4 million older or disable people and 1.7 million informal careers [9] AT allow children to move around their environment, communicate with others and take part developmentally appropriate activities that they would be unable to do without technology. However, some critical aspects of AT industry in Europe were emphasized [7], in particular with regard to innovation. The following limitations were notably identified: the characteristics of companies (e.g. segmentation in accordance with disabilities) or quasi-monopolistic competition; the influence of the third party supporting parts of the costs of Assistive Technologies (e.g. health insurance, power of associations); the lack of

knowledge of end-users needs (needs related to using and purchasing AT). Specialized or medicalized products also bear the risk of stigmatizing their users [5] because they tend to emphasize the disability in the person's social identity. Finally, although the global volume of the market may seem important, particularly if elderly people are included, it appears to be divided into numerous niches, segmenting the market as a function of user's disabilities (motor, sensory or cognitive disabilities) or functional impairments.

The remote control remains one of the most cited examples of a technological innovation coming from the field of disability, but Universalist movements have provided many other examples of products, equipment and pieces of architecture that facilitate and improve everybody's life [6] domestic appliances designed for people with strength or dexterity impairment (e.g. Oxo products, Panasonic's accessible washing machine), urban architecture (e.g. curb, inclined planes) improving accessibility for people using a wheelchair, but also for parents using a baby stroller or travelers pulling a suitcase, and public transportation (e.g. Amtrack Acela Express, with all interior spaces accessible, improve signaling means, and accessible platforms).

2. BENEFITS OF ASSISTIVE TECHNOLOGY

The average child has acquired an impressive range of skill is the five years of age. These include independence movement, play and communication [2]. They can in general feed, dress and clean themselves. They can operate equipment (televisions, videos, lights) within the home, access a wide range of toys and they can move throughout the home and the school environment more or less at will. Appropriately supplied and supported, AT can enable many children with physical disabilities to undertake all of these activities with differing levels of independence. AT can be used to address needs in relation to sensory impairment, learning, feeding, personal care, communication, mobility, posture and play.

2.1 Model Wheelchair Design

The mobility of vehicles it's characterized by two factors: type of wheels that have their disposition upon a mechanic structure.

During the movement, the plane of the wheel remains vertical and the wheels rotate around its axis (horizontal). Its orientation relative to the frame can be fixed or variable.

Other aspect considerable on the project of a vehicle it's the type of system of traction and direction. The system of traction and direction isn't associated only with disposition of adopted wheels, but also associate with algorithms of motor control and the mechanic associated. This work was development a platform with independent motors on the same axis of wheels, beyond of caster wheels used for stabilization of the structure, as show below in the

Figure 1.

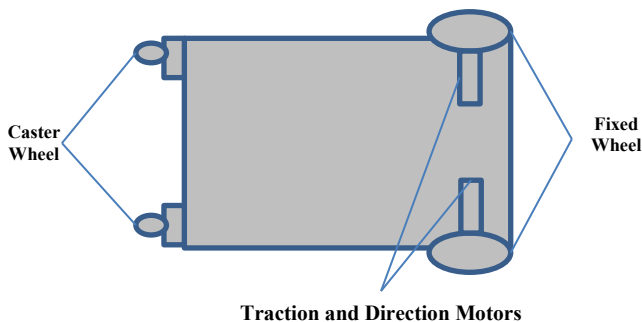


Figure 1 - System of traction and direction in the same axis.

The only disadvantage which has is that the motors has identical characteristic, otherwise their control will not be simple.

After designed, was constructed and mounted according to with the specifications a support for insert a child seat. The diagram of function and connections can be showed below in the Figure 2.

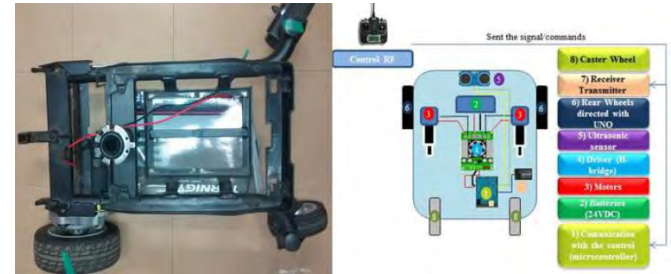


Figure 2 - Electrical scheme of the wheelchair with the implemented system.

2.2 Kinematics Model

Establish the robot speed $\dot{\xi} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\theta}]^T$ as function of the wheel speeds $\dot{\phi}_i$, steering angles β_i , steering speeds $\dot{\beta}_i$ and the geometric parameters of the robot (configuration coordinates) as shown in Figure 3.

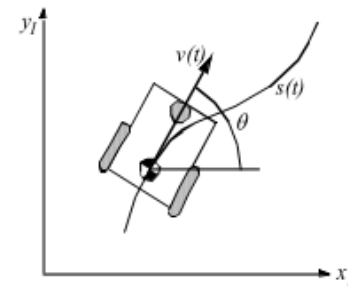


Figure 3 - Represents a Kinematics Model.

To forward kinematics, we have:

$$\dot{\xi} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = f(\phi_1, \dots, \phi_n, \beta_1, \dots, \beta_m, \dot{\beta}_1, \dots, \dot{\beta}_m) \quad (1)$$

To inverse kinematics, can be considered:

$$[\phi_1 \dots \phi_n \ \beta_1 \dots \beta_m \ \dot{\beta}_1 \dots \dot{\beta}_m]^T = f(\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta}) \quad (2)$$

why not,

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} = f(\phi_1, \dots, \phi_n, \beta_1, \dots, \beta_m) \quad (3)$$

In the Figure 4, we are representing the robot within an arbitrary initial frame.

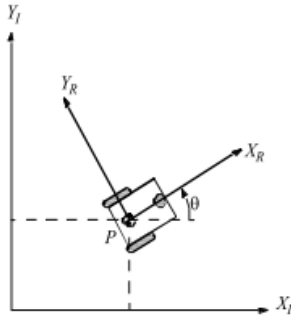


Figure 4 - Representing robot position.

We have the follow conditions:

- Initial frame: $\{X_I, Y_I\}$
- Robot frame: $\{X_R, Y_R\}$
- Robot position: $\xi_I = [x \ y \ \theta]^T$
- Mapping between the two frames, we obtain:

$$\dot{\xi}_R = R(\theta) \dot{\xi}_I = R(\theta) \cdot [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\theta}]^T \quad (4)$$

where,

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2 Wheel Kinematics Constraints: Caster Wheel

The development of the wheelchair consists in use of a caster wheel that offer with relation the structure projected. The Figure 5 below, demonstrate a kinematics of a caster wheel.

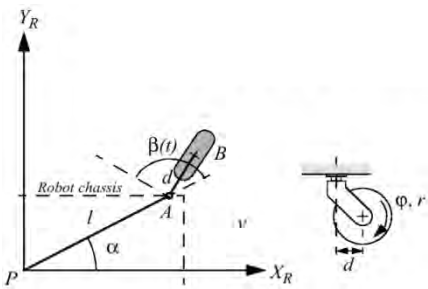


Figure 5 - Caster wheel represented.

According to kinematics model presented, we have the following equations:

$$[\sin(\alpha + \beta) \quad -\cos(\alpha + \beta) \quad (-l)\cos\beta]R(\theta)\dot{\xi}_I - r\dot{\phi} = 0$$

$$[\cos(\alpha + \beta) \quad \sin(\alpha + \beta) \quad (d + l)\sin\beta]R(\theta)\dot{\xi}_I - d\dot{\beta} = 0$$

3. METHODOLOGY AND PROGRAMMATION

3.1 RF Control

While many devices are available to help people with lower levels of disability, people with a capacity of minimal or no movements (for example, people with quadriplegia) probably would need more assistance and they have very limited options for take care of themselves. AT help improve the quality of life for people with severe disabilities and considering these trends, are essential to help them; therefore it is necessary to use very specific skills that patients can do without problems [1]. The RF control has a signal receiver or pulse width whereupon is connected with microcontroller. The signal is send to Turnigy control (joystick) which is responsible for direction control and velocity of the motors left and right as a show in the block diagram, divided in phases, in the Figure 6.

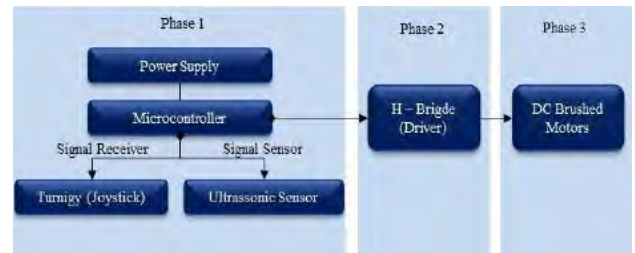


Figure 6 - Block diagram: Phases of the RF control system

However, searching the literature for independent control systems that are used in radio control electric wheel chairs were not found. The objective of this work is to deal with a wheelchair with simple commands for movements with the joystick and avoid obstacles in an indoor environment accurately and easy to use interface, minimally invasive, low cost, reliable and discreet.

3.2 Phase 1

The phase one, wheelchair batteries have to supply +24 VDC to the motors, so it was decided to supply the system with +5 VCD with help from a high power voltage regulator, besides which the commands were programmed to detect obstacles and correct direction. When commands are configured, it is important to correctly position the sensors to get precision in the movement of the wheelchair. The programming of the commands is performed on the Arduino environment, using a microcontroller, ATMEGA328, which is located in the circuit board Arduino UNO for processing the signal of the magnetic control system with an I2C interface. To explain how it works microcontroller programming, Figure 7 shows more in detail the processes performed by the system. On the other hand, joystick and sensor circuits were added alternatively to control the movement of the wheelchair to connect

analog and digital inputs to determine the directions that follow.

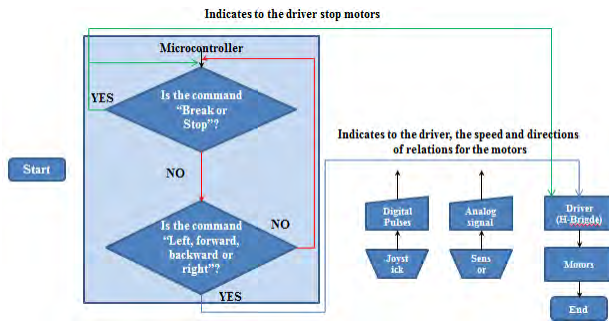


Figure 7 - Flow diagram: Functional system

3.3 Phase 2 and 3

The 2nd and 3rd phase focuses on using a driver (H-Bridge) that receives signals from the microcontroller and this in turn provide the necessary voltage to the motors through a PWM control technique. The driver used was a dual motor driver sabertooth 2x60; the first is the most versatile, efficient and easy to use on the market. Among its most important specifications are able to work with a 6V – 33.6V input voltage, output current: 60A per channel, 120A peak output current per channel, and 3 operating modes: analog, R/C and serial. As can be seen in Figure 8 are shown more details about input and output pins.

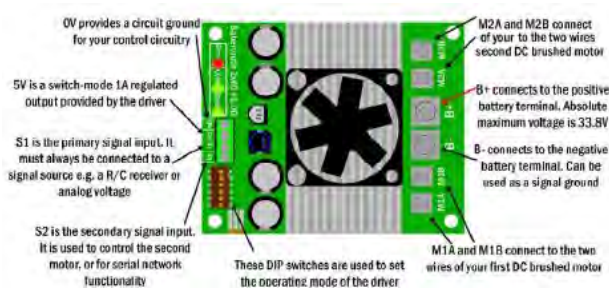


Figure 8 - Sabertooth 2x60 motor driver pin out guide

R/C input mode is used with a standard hobby Radio Control transmitter and receiver, or a microcontroller using same protocol. R/C mode is selected by setting switch 1 to the DOWN position and switch 2 to the UP position. If running from a receiver, it is necessary to obtain one or more servo pigtailed and hook them up. If switch 6 is in the UP position, then the sabertooth is in standard R/C mode. This mode is designed to be used with a hobby-style transmitter and receiver. It automatically calibrates the control center and endpoints to maximize stick usage. It also enable a timeout failsafe, which will shut down the motors if the sabertooth stops receiving correct signals from the receiver.

4. PROCEDURES

The first stage is responsible for receiving commands from the radio control and issue to the signal receiver that is connected to the microcontroller which has been programmed to initiate the trajectory. This was simulated in a real environment of the institution containing obstacles as Figure 9 below. When there are no obstacles to wheelchair follow straight line as the command of the joystick. The microcontroller was used to also get data the ultrasonic sensor, the sensor check some obstacles close to 2000mm, the wheelchair brakes and takes another path, forcing the child to change direction.

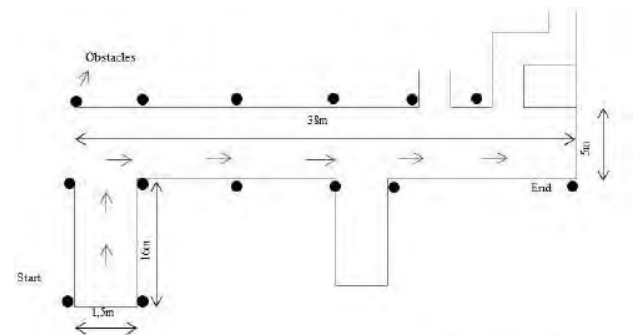


Figure 9 - Tracking obstacle course to test performance of the electric wheelchair.

4.1 Phase 2 and 3: Tracking to the test

For the last two stages, after which the signals were received and processed by the commands of the joystick and the microcontroller, the latter in turn generates new signals that carry the information for the speed and direction of rotation of the motors is responsible for generating the two PWM signals and the correct switching for changing the direction and rotation of motors.

5. RESULTS

The application with this mode of operation yielded satisfactory results in which the child is able to move her own wheelchair, either indoor or outdoor environment. The speed is adjusted according to the control voltage and sensitivity, making it safe for the child. Another factor that must be emphasized is child seat because it offers security to bearer wheelchair because it has seatbelts, allowing stability and safety during the trajectory.

In order to obtain results of user weight, maximum allowable incline, maximum speed and maximum angle capacity, the data as shown below in the Table 1.

Table 1: Features acquired during project

Unit user weight	136kg
Maximum Allowable Incline	6° degree
Maximum Angle Capacity	10° degree
Maximum Speed	4 mph

6. CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS

A prototype of wheelchair was development in order to provide the children with disability the opportunity experience independence move where they could learn to deployment driving abilities at your own pace with assistance of two controls, one used by the children and other grown up. Furthermore, this mobility provides independence, mental growth and include social these children with disability.

The ultrasonic sensor detects minimum distances that range between four centimeters or three meters, making this system inaccurate. In this paper we choose a low-cost system to which be making a product inexpensive. In this system could be adopt other wireless control, but we would need a other microcontroller integrating themselves two zig bee's, one connected in the wheelchair and the other in wireless control. The main advantage of the system is to increase the information transportation from the wheelchair. Also, an important fact is the possibility to wireless control the wheelchair in open environment with the maximum distance of 1600 meters.

The work itself is to help children to have the opportunity to drive your wheelchair using a wireless control, making it independent, but anytime will there are obstacles, the wheelchair stop and changes direction until effected a new command, making the system safe in environments with larger spaces and a smaller amount of obstacles. However, another proposal would be a smartphone using internet communication with 3G or 4G and integrate an IMU for providing location data and trajectory data.

7. AKNOWLEDGEMENT

I appreciate the guidance of faculty authors of this article and the financial support of the Research Foundation of the State of Amazonas (FAPEAM).

8. REFERENCES

Periodic publish references:

- [1] C Salem, S. Z. (1997). An isometric tongue pointing device. *Proc. CHI 97*, 22-27.
- [2] Cowan, D. M., & Khan, Y. (2005). Assistive Technology for Children with complex disabilities. *Current Pediatrics*, 207-212.
- [3] Lewis, M. S. (2000). Assistive technology for the very young: creating responsive environments. *Infant Young Child*, 12: 34-52.
- [4] Smith, M. (1994). Speech by any other name: the role of communication aids in interaction. *Eur J Discord Commun*, 29:225-40.

Book references:

- [5] Coleman, R., Lebbon, C., Clarkson, J., & Keates, S. (2003). Introduction: from margins to mainstream. *Inclusive Design: Design for the Whole Population*. Springer.
- [6] Keates, S., & Clarkson, J. (2004). Countering Design Exclusion: An introduction to Inclusive Design. Springer.
- [7] Vernardakis, N., Stephanidis, C., & Akoumianakis, D. (1995). On the impediments to innovation in the European assistive technology industry. Technical Report:
- [8] *Department of Health*. (September de 2004). Acced in October de 2013, available in www.pasa.doh.gov.uk/eat/docs/ECS_mar2004.doc
- [9] Audit Commission. (2000). *Fully Equipped*. London.

DESARROLLO DE MATERIALES, PROCESOS Y EQUIPOS MAGNETORREOLÓGICOS PARA BENEFICIO DE MINERALES

Development of magnetorheological materials, process and equipment for wealth

RESUMEN

En esta investigación se desarrolló un fluido magnetorreológico (FMR) con magnetita como material magnético, aceite como fluido de transporte y aditivos antigraavitacionales y antiaglomerantes. Se diseñó y construyó un equipo para beneficio de minerales con FMR, que permite modificar la densidad aparente del fluido, de forma directamente proporcional a la intensidad del campo magnético, flotando y hundiendo las partículas de densidad menor y mayor a la del FMR, respectivamente. Las pruebas se realizaron con carbón mineral, logrando eficiencias en la separación de cenizas, del 75 y el 86 por ciento, en muestras filtradas por tamiz 4 y 8.

Palabras clave: beneficio de minerales, densidad aparente, fluidos Magnetorreológicos, magnetita, lavado de carbones, separación gravimétrica de minerales.

ABSTRACT

In this investigation, a Magnetorehological Fluid (MRF) was developed with magnetite as the magnetic material, oil as the carrier fluid and anti-gravity and anti-caking additives. A prototype for wealth with MRF at a laboratory level was designed and built; This machine allows modifying the apparent density of the fluid, in direct proportion to the intensity of the magnetic field; the particles more dense than MRF, sink and the particles less dense than MRF, float. The testing was made with two samples coal, passed through sieves number 4 and 8. The efficiency of separating ashes was around 86 and 75 percent, respectively.

Keywords: Apparent density, Coals cleaning, Gravimetric separation of minerals, Magnetorehological Fluid, Magnetite, Wealth.

MARCO A. ARDILA B.

Ingeniero metalúrgico, M. Sc.
Profesor Asistente
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
marco.ardila@uptc.edu.co

PILAR TRIVIÑO R.

Química, M. Sc.
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
pilar.trivino@uptc.edu.co

ÉDGAR A. TORRES B.

Ingeniero electromecánico, M. Sc.
Profesor Asistente
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Edgar.torres@uptc.edu.co

CLAUDIA P. MOLINA G.

Ingeniero metalúrgico, M. Sc.
Profesor ocasional TC
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Claudia.molina@uptc.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de materiales inteligentes con propiedades químicas, eléctricas, magnéticas, mecánicas o térmicas que se pueden transformar con agentes externos [1], son de gran interés en el campo de investigación e innovación; un ejemplo, los fluidos con propiedades reológicas, en los que la viscosidad se puede modificar hasta que el fluido se comporte como un sólido, en presencia de campos magnéticos de alta intensidad, o como un fluido newtoniano, en ausencia de estos. Existen varios tipos de fluidos, como los electrorreológicos (ER) descubiertos por Willis Winslow en 1949 [2], y los magnetorreológicos desarrollados a través del tiempo por investigadores como: Rabinow (1948), Papell (1965), Rosensweig y O'Connoe (1962), Massar (1981) y Elmore (1938), [3]. Los minerales con alta concentración cada vez son más escasos, por lo que se hace necesario eliminar las impurezas presentes en estos, mediante la selección y aplicación de procesos de beneficio. Dentro de estas técnicas sobresalen los métodos de separación gravimétrica que se usan para tratar una gran variedad de

minerales, que varían desde los sulfuros pesados como la galena (peso específico 7,5) hasta el carbón (peso específico 1,3), y para tamaños de partículas muy finas. Estos métodos tienen gran aceptación debido a que los costos de operación son menores comparados con otros procesos que tienen el mismo objetivo, tales como la flotación y la floculación [4]. Uno de los pioneros de las técnicas y tecnologías de separación de material con medio ferromagnético, fue Rosenzweig, [5], [6]. Se sumaron Reimers G., Rholl S. y Khalafalla S. [7], quienes diseñaron un proceso y un dispositivo magnetogravimétrico para separación de partículas usando fuerzas de levitación no verticales. Honer F. y Quets J. [8], desarrollaron un equipo para separar pequeñas partículas de 5 mm hasta 1 µm de diámetro por diferencia de densidad. En Japón, Nakatsuka [9] desarrolló un modelo para tratar escoria de metal, utilizando FMR y un imán permanente de tierras raras; también se tratan minerales de Al, Zn, Cu, Pb con tamaños menores a 30 mm de diámetro. Otra técnica desarrollada, es el equipo Magstream [10], similar a un proceso de medios densos en centrifuga, donde se

alcanza la separación por una combinación de densidad de las partículas y propiedades magnéticas.

El proyecto plantea demostrar la viabilidad técnica para desarrollar una adaptación de la técnica y la tecnología del proceso de beneficio de minerales, por diferencia de densidades con FMR. Para lograr estas metas, se debe diseñar y producir un fluido magnetorreológico, a partir de magnetita mineral de yacimientos colombianos [11]; e igualmente, diseñar y construir un prototipo de máquina para llevar a cabo el proceso de beneficio de minerales con FMR a nivel de laboratorio.

De esta forma, el artículo presenta los resultados del método experimental aplicado para la obtención del ferrofluido, la simulación del comportamiento de una partícula levitando en FMR, afectado por un campo magnético, y del proceso de diseño mecánico del prototipo, para el cual se aplicó el método de French [12] correlacionado con las necesidades del diseño. Finalmente, se presentan los resultados de las pruebas de operación del equipo de beneficio de minerales, aplicada a la separación de cenizas del carbón en medio denso, que para este caso es el FMR de densidad variable, en proporción directa a la intensidad del campo magnético.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Preparación y simulación del FMR.

Se llevó a cabo de acuerdo con la secuencia de actividades relacionadas en la figura 1.

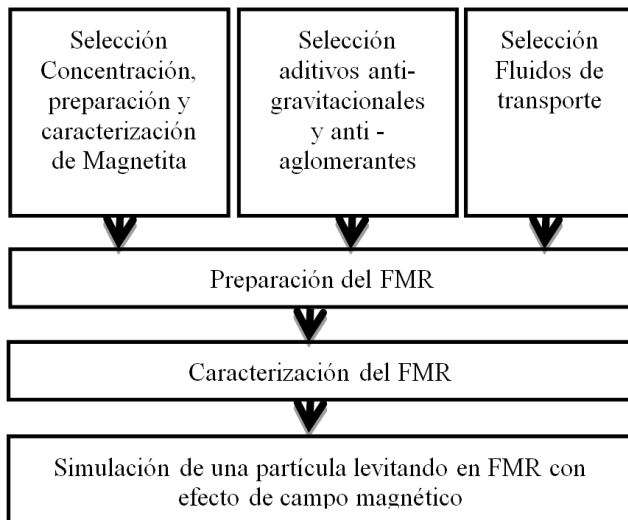


Figura 1. Secuencia metodológica de la preparación y simulación del FMR.

2.2 Diseño y construcción del prototipo para beneficio de minerales con FMR.

A partir de un análisis de operaciones, se define la ubicación de los elementos y la distribución del sistema,

para verificar el flujo y el balance de carga representado en el diagrama de la figura 2.

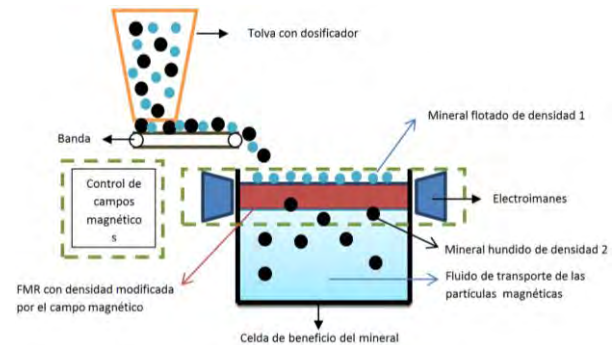


Figura 2. Diagrama de flujo y configuración del proceso.

El proceso de diseño mecánico del equipo se realiza correlacionando el método de French, con los requerimientos propios del equipo para beneficio de minerales por métodos gravimétricos, empleando FMR (figura 3).

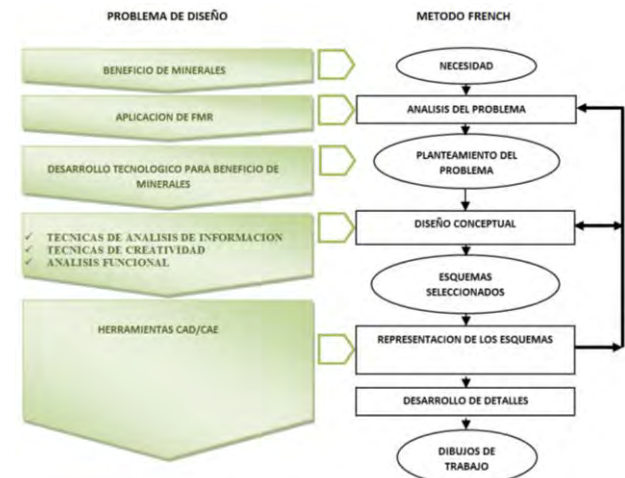


Figura 3. Correlación del problema de diseño con el método French.

Se aplicaron técnicas de análisis de información, creatividad y análisis funcional, entre otros procedimientos, teniendo en cuenta conceptos de diseño para manufactura, ensamble, usabilidad, tamaño del cuerpo humano, postura, alcance y movilidad, fuerza y potencia, así como rapidez y acción controlada. El proyecto concluye con la construcción y pruebas de funcionamiento del equipo.

3. RESULTADOS

3.1 Selección, concentración, preparación y caracterización de magnetita (Fe_3O_4)

Se analizaron muestras del Hobo (Huila), y de arenas negras del Río Magdalena de Puerto Colombia (Atlántico). La caracterización química, por vía húmeda,

registra contenidos de Fe_3O_4 , del 49.71% en las arenas negras, y del 50.4% en la muestra del Hobo. Las propiedades de las arenas de Puerto Colombia (contienen hasta 50% de minerales pesados acumulados por la acción de las olas) favorecen el proceso de concentración y reducción de tamaño; en consecuencia, fue el mineral de magnetita seleccionado.

La concentración del mineral se realizó en un equipo de separación magnética de tambor; la caracterización, por análisis petrográficos, de fluorescencia de rayos X (FRX) (tabla 1), difracción de rayos X (DRX), microscopio electrónico de barrido (MEB), y propiedades magnéticas.

PETROGRAFÍA		FRX	
Compuesto	%	Compuesto	%
Magnetita	76.0	Fe_3O_4	75.1
Piroxeno	7.5	FeTiO_3	8.02
Anfíboles	6.0	SnO_2	4.9
Epidotita	3.5	Cl	4.3
Cuarzo	2.0	Cs_2O	2.3
Circón	0.5	BaO	2.0
Feldespatos	2.5	ZrO_2	1.5
Granate	0.5	Co_3O_4	1.4
Clorita	1.5	Rb_2O	0.1
-	-	ThO_2	0.3
-	-	SrO	0.04

Tabla 1. Análisis petrográficos y de FRX.

El análisis de fases indica la cristalinidad de la magnetita; el difractograma confirma la presencia de cuarzo e ilmenita, además de otros compuestos no definidos por superposición de picos. Para la identificación de fases y la indexación, se compara el difractograma con las fichas de PDF-2 Release 2005 en el programa *X'pert High Score Plus* (figura 4).

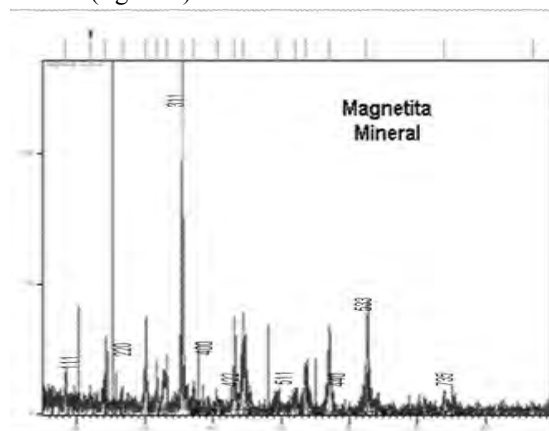


Figura 4. Difractograma de magnetita mineral.

La micrografía del mineral original permite diferenciar los cristales prismáticos de magnetita. Luego del tratamiento mecánico esta distinción desaparece, observándose un sistema particulado de morfología homogénea. La magnetita mineral se ve una sola masa, lo cual significa que se aglomera, posiblemente porque al reducirla de tamaño se genera supermagnetismo. Es posible que con la molienda haya ocurrido una activación

mecánica de los sólidos cristalinos por acción de ciertos equipos de molienda produce alteraciones y cambios texturales, que pueden llegar a ser estructurales, aunque éste no es el caso, pero tienen gran interés en el desarrollo de materiales [13]. (figura 5).

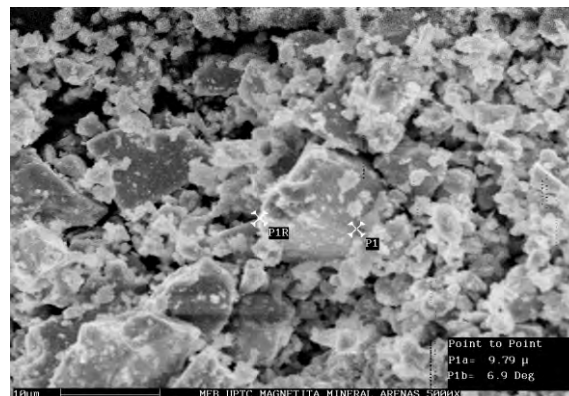


Figura 4. Micrografía MEB de magnetita.

El ciclo de histéresis y las propiedades magnéticas de la magnetita se realizaron en un magnetómetro tipo SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) Quantum Design MPMS (*Magnetic Property Measurement System*). A temperatura de 8 K. La curva de histéresis de la magnetita (figura 6), confirma comportamiento superparamagnético, por la tendencia de partículas a segregarse para formar aglomerados cuyos polos magnéticos inducidos en la superficie pueden generar campos de desmagnetización con lo que se reducen los momentos magnéticos efectivos y la permeabilidad [14] acorde a la interpretación de los resultados del MEB.

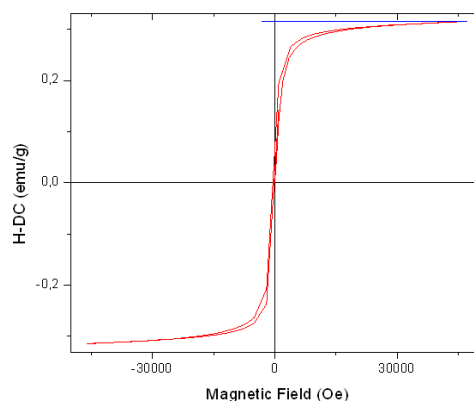


Figura 6. Curva de histéresis de la magnetita.

Para la selección de aditivos, fluidos de transporte y preparación del fluido, se tomaron como base los parámetros sugeridos por Kalafalla [15] y Carson [16], con referencia a magnetita, fluido portador y tensoactivo. Se siguió el procedimiento propuesto en la investigación para obtener ferrofluidos a partir de magnetita mineral [11], realizada por el Grupo de Carbones y Carboquímica de la UPTC [3]. Como resultado se preparó un FMR

compuesto por 30% en peso de magnetita, adiciones de tensoactivo de tipo aniónico, dodecil sulfato de sodio al 3%, y ácido oleico 5% como dispersante, en un 42% en peso de aceite lubricante para motores 20W30.

3.2 Simulación del comportamiento de una partícula levitando en FMR afectado por un campo magnético

3.2.1 Definición de sistema. La técnica para la obtención de flotados y hundidos de un mineral no magnético consiste en la levitación y hundimiento selectivos, con base en las densidades de la partícula y del medio de separación. Cuando un FMR se expone a un campo magnético externo, aumenta su densidad con el aumento de la intensidad del campo. Este comportamiento se puede modelar a partir del sistema mostrado en la Figura 7:

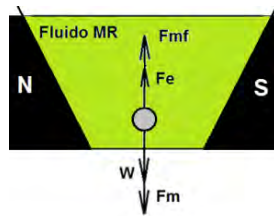


Figura 7. Comportamiento de la partícula al aplicar campo magnético externo.

Donde N y S representan los elementos generadores del campo magnético con gradiente en función de la altura; F_m , fuerza de tracción magnética; W , fuerza gravitacional; F_e , fuerza de flotación (principio de Arquímedes); F_{ef} , fuerza de flotación aportada por el FMR.

3.2.2 Formulación del modelo. [17] Sin considerar efectos de inercia, el sistema de fuerzas que actúan sobre una partícula no magnética suspendida en un volumen de FMR, afectado por un campo magnético, es:

$$W = mg = \rho_p V_p g \quad (1)$$

$$F_m = \frac{1}{\mu_o} k_p V_p B \nabla B \quad (2)$$

$$F_e = V_f g \rho_f \quad (3)$$

$$F_{mf} = \frac{1}{\mu_o} J_f V_p \nabla B \quad (4)$$

3.2.3 Preparación de datos: los datos de entrada corresponden a los parámetros de valor constante como W , densidad aparente del fluido en ausencia de campo magnético, intensidad del campo magnético, fuerza de empuje y densidad de la partícula. Los datos de salida corresponden a la densidad del punto de corte, en el cual se mantiene levitando una partícula.

3.2.4 Implementación del modelo en computador: el modelamiento del sistema se hizo con ANSYS (Licencia de la Universidad Santo Tomás de Aquino –Tunja).

3.2.5 Pre y postprocesamiento: Sobre la geometría trapezoidal de la celda de flotación se genera el mallado y se aplican las cargas, se definen las condiciones de frontera y se verificaron las propiedades de materiales para proceder al procesamiento de datos. Los resultados gráficos se presentan en la figura 8.

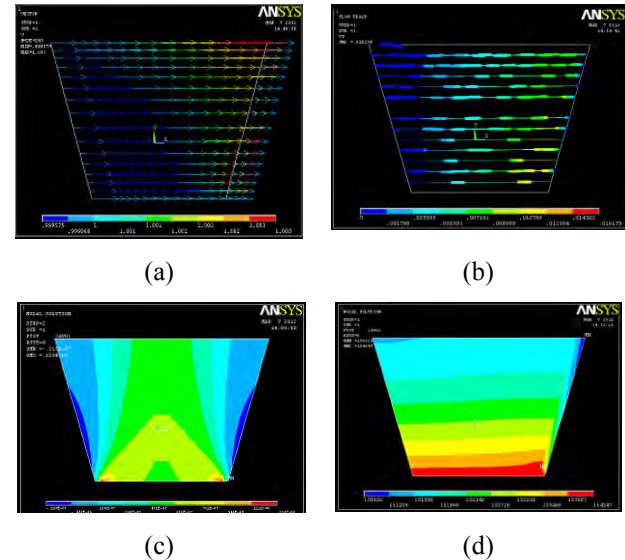


Figura 8. Postprocesamiento del modelo. (a) Aplicación de vectores en dirección del campo magnético. (b) Alineación de partículas del FMR. (c) Solución nodal del campo magnético. (d) Solución nodal de contorno para distribución de densidades del FMR en función del campo magnético.

La simulación registra un aumento en la densidad del FMR, debido al gradiente de campo magnético aplicado. A mayor campo que se concentra, más magnetita por la fuerza externa recibida (parte más cercana entre los extremos del campo magnético). La diferencia de densidades se comprueba experimentalmente, corroborando la tendencia de incremento en la misma dirección del campo magnético. Ver tabla 2.

DATOS EXPERIMENTALES		SIMULACIÓN
Campo Magnético	Densidad (g/cm ³)	Densidad (g/cm ³)
0	1.01	1.515
5	1.01	1.523
20	1.07	1.527
100	1.1	1.531
150	1.12	1.534
200	1.25	1.538

Tabla 2. Comparación densidad experimental y simulada.

3.3 Prototipo para beneficio de minerales con FMR

La figura 10 tiene la siguiente configuración: **sistema de alimentación:** tolva con dosificador de banda transportadora. **Celda de beneficio:** contenedor no metálico del FMR y de la carga de mineral a tratar; es permeable a los campos magnéticos, siendo el dispositivo en el cual, el FMR modifica su densidad por acción del campo para llevar a cabo el proceso de beneficio del mineral. **Sistema de Separación de hundidos:** banda transportadora con canaletas. **Sistema de Separación de flotados:** tornillo sinfín con sistema de recuperación de fluido magnético que fluye adherido a las partículas flotadas. **Sistema de recuperación y recirculación del FMR:** malla de acero vibratoria, para separar el FMR de los materiales sólidos, con colectores independientes. El fluido, finalmente, se recircula hacia la celda de beneficio. **Sistema de control:** sistema de lazo abierto, programable por el usuario, según características del material a beneficiar.

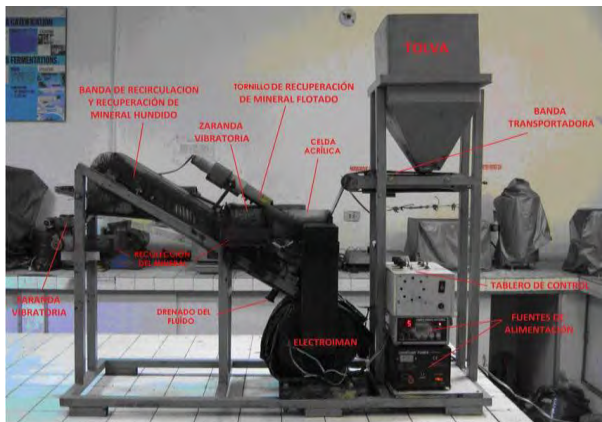


Figura 10. Fotografía del prototipo.

3.4 Resultados de las pruebas de operación

Las pruebas de operación del equipo se realizaron a partir de una muestra de 1000 g de carbón coquizable, sometida a molienda; de esta se obtuvo una primera fracción de 458 g pasados por un tamiz estándar No.8, y una segunda fracción de 542 g pasados por un tamiz estándar No. 4. Los resultados de las pruebas del equipo para beneficio de minerales con FMR, medidos en la separación de cenizas de los carbones flotados, a diferentes densidades y granulometrías, se muestran en la tabla 3.

Muestra	Pmi (g)	Czi %	De FMR (g/cc)	Pmf (g)	Czt %	Czs %	n %
Muestra inicial	1000	15.40	-	-	15.40	0	-
Tamiz ASTM No. 4	542.0	14,86	1.23	466.0	13.56	1.3	86
Tamiz ASTM No. 8	458.0	15.40	1.36	343.5	14,00	1.4	75

Tabla 3. Resultados de las pruebas de separación de cenizas para una muestra de carbón, en el equipo de beneficio de minerales con FMR.

Donde: Pmi: peso muestra inicial, Czi: cenizas de la muestra inicial, DeFMR: densidad equivalente del FMR, Pmf: peso muestra flotada, Czt: cenizas de la muestra flotada, Czs: cenizas separadas, n: eficiencia proceso beneficio. La eficiencia del proceso se da en función del peso de carbón flotado con respecto a la muestra inicial de cada tamiz.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados de las pruebas de operación del equipo registran 1.3 y 1.4 por ciento de separación de cenizas en las fracciones flotadas, para granulometrías pasadas por los tamices ASTM No. 4 y No. 8, respectivamente. En términos de rendimiento de proceso se observa que de una carga de 542 gramos, con cenizas iniciales de 14.86% y granulometría pasada por tamiz No.4, se recuperaron 466 gramos con 13.56% de cenizas; es decir, que la eficiencia del proceso para estas condiciones, es del 86%. En los mismos términos para los resultados de la muestra pasada por tamiz No. 8, la eficiencia es del 75%. Con base en los resultados obtenidos, se concluye que la producción de FMR a partir de magnetita y el desarrollo de técnicas y tecnologías para el proceso de beneficio de minerales con fluidos magnetorreológicos, es técnicamente viable y funcional.

Como consecuencia de este mismo análisis, se evidencia la necesidad de optimizar el diseño del equipo a nivel de sistemas de control, para lograr mayores niveles de precisión y eficiencia en el proceso.

A través de esta investigación se ha desarrollado a nivel de laboratorio, la adaptación tecnológica de un modelo de utilidad para un equipo de beneficio de minerales, con FMR; igualmente producidos a partir de magnetita mineral de yacimientos colombianos.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido por parte de Colciencias, la Gobernación de Boyacá, la Dirección de Investigaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, y el Centro de Investigaciones de la Universidad Santo Tomás Seccional Tunja, así como a los semilleros de investigación que participaron en este proyecto.

5. BIBLIOGRAFÍA

Referencias de publicaciones periódicas:

- [1] A.G. Olabi and A. Grunwald. *Design and Application of Magneto-Rheological Fluid, Materials & Design*, Volume 28, Issue 10, 2007, Pages 2658-2664

- [2] T. C. Halsey, R. Kamien, J. Martin, J. Odinek, *Structure and dynamics of electrorheological fluids*, *Physical Review E*, Volume 57, Number 1 January 1998.
- [3] M.P. Triviño, M.A. Ardila, E.A.Torres, C.P. Molina. Informe Final proyecto de investigación: *Desarrollo de materiales, procesos y equipos magnetorreológicos para beneficio de minerales*. UPTC, USTA, Colciencias, Gobernación de Boyacá. 2012.
- [4] C. A. Osorio M., J. M. Marín, J. F. Peláez Restrepo y V. G. M. Restrepo, Evaluación de un sistema de clasificación hidráulica para separación diferencial de mezclas sólidas, *Revista Ingeniería E Investigación* Vol. 29 No. 3, Diciembre 2009 (36-41)
- [5] V.N. Gubarevich And. S.V. Vidsota, Theoretical principles, present status and prospects for development of material separation in magnetic fluids. *Magnetic and Electrical Separation*, Vol. 5, pp. 169-192, 1994.
- [6] R.E. Rosensweig, *Material separation using ferromagnetic liquid techniques*. U.S. Patent 3,485,969, Dec. 16, 1969.
- [7] G.Reimers, S.Rholl, Khalafalla S., *Device and process for magneti-gravimetric particle separation using non-vertical levitation forces*. U.S. Patent 5,788, 465. Jan 29,1974.
- [8] F. Honer, J. Quets., *Apparatus and process for the separation of particles of different density with magnetic fluids*. U.S. Patent 4,062,765, Dec. 13, 1975.
- [9] K. Nakatsuka, Trends of magnetic fluid applications, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol122, pp 387-394, Japan, 1993.
- [10] T. kojovic, Application of magstreamin mineral sands separation, *Magnetic and Electrical Separation*, Vol. 5, pp. 231-263.
- [11] M. A. Ardila, M.P. Triviño, E.A.Torres, C.P. Molina, Obtención de ferrofluidos a partir de magnetita mineral y determinación del efecto del tipo de fluido de transporte y la concentración de magnetita sobre la densidad, *Investigium Ire*, volumen 1, número 3, pp. 69 - 73, ISSN 2011-9836. USTA Tunja, 2010.
- [12] N. Cross, Métodos de Diseño. *Estrategias para el diseño de productos*, México: LIMUSA, Noriega Editores, ISBN 968-18-5302-4, 1999.
- [13] E.F. Botta, J.M. Aglietti, Porto López, Activación mecanoquímica de mezclas de reacción en la formación de espinelas Al-Fe p.m. *Anales SAM*, 1999 229-233 p
- [14] V. Caffarena, J. Capitaneo; T. Ogasawara, and M. Pinho. Microwave absorption properties of Co, Cu, Zn: substituted hexaferrite polychloroprene nanocomposites. *Mat. Res.* vol.11 no.3 July-Sept. 2008.
- [15] S.E. Khalafalla and G. W. Reimers (1973a) Separating nonferrous metals in incinerator residue using magnetic fluids. *Separation Sci.*, 8(2), 161-178.
- [16] J. D. Carlson, What Makes A Good Mr Fluid? , *8th International Conference on Electrorheological (ER) Fluids and Magneto-rheological (MR) Suspensions*, Nice, July 9-13, 2001.
- [17] J. Svoboda. Densimetric separation of coal using magnetic fluids. *Advanced Technologies Worldwide*, PO Box 73508, Fairland 2030, Johannesburg, South Africa.

SATELLITE MISSION LIBERTAD 2

ABSTRACT

Sergio Arboleda University giving continuity to the spatial research line began on April 27, 2007 with the launch of the first Colombian pico satellite Libertad 1 from the Baikonur's Cosmodrome in Kazakhstan, has started the Libertad 2 satellite mission which expects to put in LEO (Low Earth Orbit) a nano satellite CubeSat type. This mission has the objective to develop a optical payload to capture images of the Earth's Surface. In this work will be presented important information about some satellite Libertad II subsystems.

Keywords: Cubesat, Libertad 2, Payload

FREDDY DÍAZ

Ingeniero electrónico, M. Sc.
Director Optical Payload
Universidad Sergio Arboleda
freddy.diaz@correo.usa.edu.co

JORGE SOLIZ

Ingeniero mecánico, M.Sc.
Director misión satelital Libertad 2
Universidad Sergio Arboleda
jorge.soliz@usa.edu.co

CRISTIAN ARBELÁEZ

Joven investigador
Universidad Sergio Arboleda
cristian.arbelaez@correo.usa.edu.co

1. INTRODUCTION

After the successful launch and operation of the first Colombian satellite Libertad 1 (April 2007), the Universidad Sergio Arboleda at Bogotá, pursuing the consolidation of the aerospace field as an institutional strategy, started activities towards the development of the second Colombian Cubesat Libertad 2 [1].

The project aims at designing, building, assembling and launching a 3 Units Cubesat. The Cubesat will also include a camera for earth observation purposes and will validate models for control and distribution of power. The Libertad 2 structure is shown in *Figure 1*.

Satellite's specifications:

- Classification: Nano Satélite
- Weight: 4 Kg
- Standard: CubeSat
- Application: Earth Observation
- Type of Orbit: LEO
- Altitude: 600 up to 700 km
- Frequencies Band: UHF/VHS/S

Satellites's Subsystems:

- Electrical Power system (EPS)
- Attitude and Determination Control System (ADCS)
- Thermal Control System (TCS)
- Comand and Data Hadling (CDH)
- Communications and Earth Station (COMM & ET)
- Optical Payload (PYL)

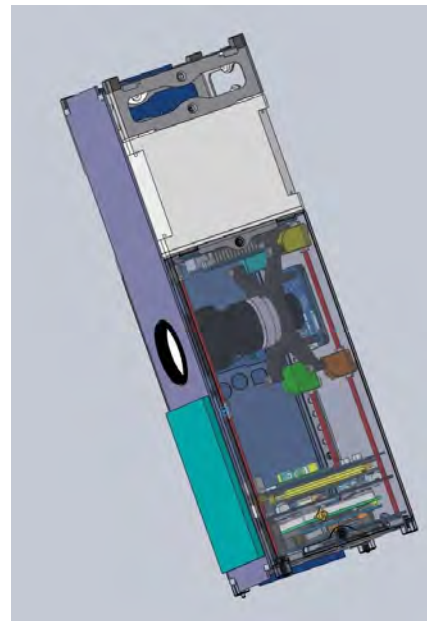


Figure 1: Satellite Libertad I

2. CONTENT

Subsystems' specifications:

A description of some subsystems that compose the satellite Libertad 2 is presented below

2.1 Electrical Power System

An estimation of the electrical consumption for each satellite subsystem is presented in *Table 1*

Libertad 2 ADCS

The Libertad 2's ADCS is the pumpkin MAI- 100 kit, it is manufactured by Maryland Aerospace and supports the Cubesat standard. Figure 6 shows a photograph of the MAI-100. This ADCS has the following features:

- MAI -100 and external magnetometer
- Interfacing to the CubeSat Kit
- Payload adapter plate
- Caps for the payload
- Control Software

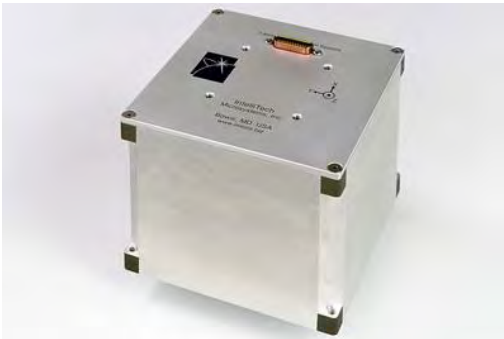


Figure 6: MAI-100. Miniature 3-Axis Reaction Wheel & Attitude Determination and Control System for CubeSat Kit™ Nano satellites

MAI-100

MAI -100 gives the satellite a high precision pointing capability. It has 3 reaction wheels and 3 magnetorquers as actuators. Its sensors have a magnetometer and is possible to add sun sensors, which use voltage information from the solar cells. The accuracy of the MAI-100 is 1° but is possible to achieve greater accuracy with external sensors.

The MAI -100 is controlled by the C&DH, and it can provide telemetry information, i.e. wheel speed, torque of magnetorquers, temperature, etc.

MAI-100 parameters

- Typical life time: 5 years
- 1° of precision with included sensors
- Maximum momentum by wheel 1.1 mNms
- Maximum torque by wheel 0.635 mNm
- Power: typ 1.5 W max< 45 W, @+12 V.

Parameter	Value	Units
Operation temperature	-40 a +80	°C
Supply voltage	+16	Vdc

RS-232 input voltage	-25 a +25	Vdc
Vibration	>10	grms

Table 2. ADCS Operations parameters

Parameter	Part	Min	Typ	Max	Units
Width	ADCS	99.9	100.0	100.1	mm
Depth		99.9	100.0	100.1	
High		78.70	78.74	78.78	
Mass			865		
Width	Magnetometer		28.7		mm
Depth			28.7		
High			27.9		
Mass			20		

Table 3. ADCS Physical features

MAI-100 integration

The MAI -100 occupies a satellite cross section of 100mm x 100mm, and no cable or other component could pass through it. Any components on either sides of the MAI- 100 must be connected through the PCBs of the solar panels.

Measurements

The attitude determination depends on the satellite sensors. The measurements from each sensor pass through the communication bus by the interface module and go to the ADCS controller; however the C&DH may request measurements of the sensors which can be sent by radio as a part of satellite telemetry.

Disturbs

Being a low-orbit satellite, it is necessary to consider the disturbances to which the satellite is exposed and for which the MAI-100 is designed. These disturbances are: gravity gradient, solar radiation, Earth's magnetic field and aerodynamic drag. These perturbations generate torques on the satellite that eventually affects its orientation. The magnitude of theses torques is between 10^{-4} y 10^{-6} Nm.

Libertad 2 operation stage

ADCS Libertad 2 operation stage are: **camera stage**, when the satellite has to take a picture, **Antennas stage** and **Cells stage**, orientate the satellite towards the sun or earth to charge the batteries or to transmit the payload imagines. The command to perform an operation stage is sent from the ground station and received by the C&DH; the order does not go directly to the ADCS.

2.3 Command and Data Handling

For the development of the C&DH it must be chosen an architecture that fulfills the mission requirements with a high degree of reliability and robustness. The mission Libertad 2 has a bus architecture with distributed processing, the C&DH acts as a master of the network as shown in the Figure 7.

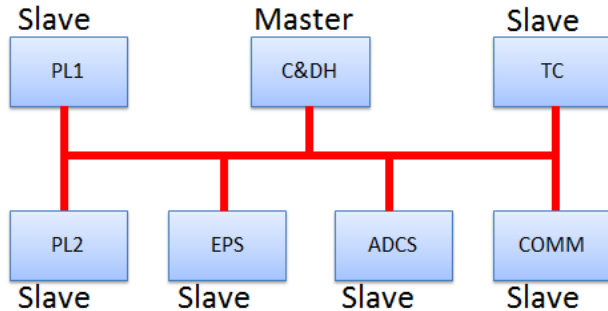


Figure 7: Mission Architecture [1]

The C&DH will coordinate the operations of the satellite and interact with every subsystem of the mission [4]. The Command and Data Handling system has the following functionalities:

- Manage operating modes and states of the satellite
- Manage operating modes and states of each subsystem
- Collect status of the subsystems
- Process commands received from ground station
- Elaborate data frames to data and telemetry download
- Fault management

Operating Modes

It is very useful to define the operating modes for the satellite mission and also for all the subsystems; the objective is to define a unique specification of how do the satellite is going to operate and standardize the basic states in which the satellite can be at any moment. Having defined the operating modes for the mission, each module can define its own operating states, conditions and actions to realize. Figure 8 shows the preliminary operating modes for the satellite mission Libertad 2.

There are six states defined, each one of them has its conditions and actions to perform, depending on many factors directly related to the operation of the mission and the state of each subsystem. It is also defined the role of each subsystem in a given state.

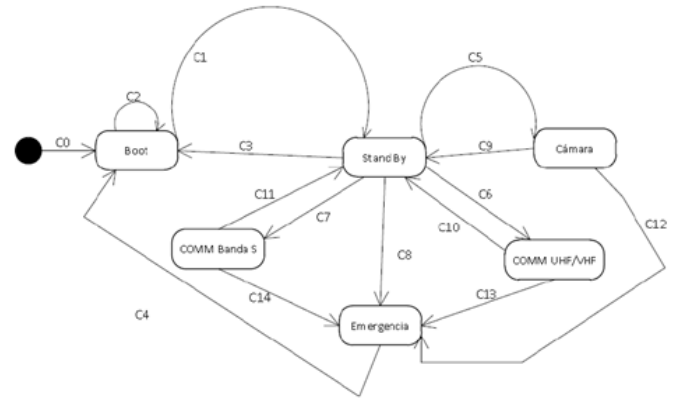


Figure 8: Operating Modes for Libertad 2

Boot Mode: This is the initial operating mode of the mission; it starts just after the satellite deployment on space. In here, the C&DH starts the boot sequence; sense the state of each subsystem and waits until the satellite reach certain degree of stabilization. Below are defined the roles of each subsystem.

- C&DH: Start Boot Sequence
- ADCS: Stabilization (B dot).
- EPS: Enable voltage buses. Charge Batteries (If necessary).
- COMM: Antenna deployment
- TC: Maintain temperature in range

Stand By Mode: In this mode there are no special functions to perform on the satellite, the spacecraft is orbiting the earth and has to be on a minimum consumption mode.

- C&DH: Data Collect
- ADCS: Orient camera to shadow
- EPS: Minimum consumption. Charge Batteries.
- COMM: Transmit Beacon
- TC: Maintain temperature in range
- PL: Camera Off

Camera Mode: In this mode the objective is to take a picture, the camera has to be oriented to the earth at a specific time and location previously commanded to the satellite.

- C&DH: Capture Sequence
- ADCS: Orient camera to objective
- EPS: Supply power. Charge Batteries (If necessary).
- COMM: Transmit Beacon
- TC: Maintain temperature in range
- PL: Camera On. Capture mode

COMM UHF/VHF Mode: This mode is intended to permit a better communication between the ground

station and the satellite. The objective is to transmit telemetry and receive commands from earth.

- C&DH: Telemetry Sequence
- ADCS: Orient camera to shadow and antennas to earth
- EPS: Supply power
- COMM: Transmit Beacon
- TC: Maintain temperature in range
- PL: Camera Off

S Band Mode: This mode has the objective to transmit the images already taken by the camera.

- C&DH: Telemetry Sequence. Image Transmission Sequence
- ADCS: Orient camera to shadow and antennas to earth
- EPS: Supply power
- COMM: Transmit Beacon. Radio S Band On
- TC: Maintain temperature in range
- PL: Camera Off

Emergency Mode: This mode is a failure point where the team has to make decisions about failure situations for each subsystem and the actions to be made for every situation.

2.4 Communications (S-Band)

The principal objective of this subsystem is to send the Payload images to the ground station located in Bogota-Colombia. To send the images, the S-band communications subsystem has some equipment listed below:

- Transmitter radio (In satellite)
- Microstrip antenna (In satellite, Transmission)
- Dish antenna (Ground station, reception)
- Receiver Radio (Ground station, reception)

Some images and characteristics of the communications subsystem equipment are presented below:

Transmitter radio (In Satellite)

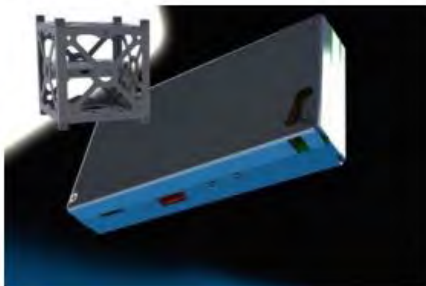


Figure 9: Transmitter Radio [5]

Hispico transmitter characteristics	
Modulation	D-QPSK
Frequency	2.2-2.3GHz
Data Rate	1.06 Mbit/s
Band Width	1.5 MHz
RF Power	+27dBm
Price	6500€

Table 4. Hispico transmitter [5]

Microstrip antenna (In Satellite):

Some elements of the communications subsystems such as the radios and receiving antenna are going to be purchased from different companies like HISPICO and ISIS, but the Microstrip patch antenna was designed by the university research group. The final design of the antenna is presented in Figure 10 and Table 4.

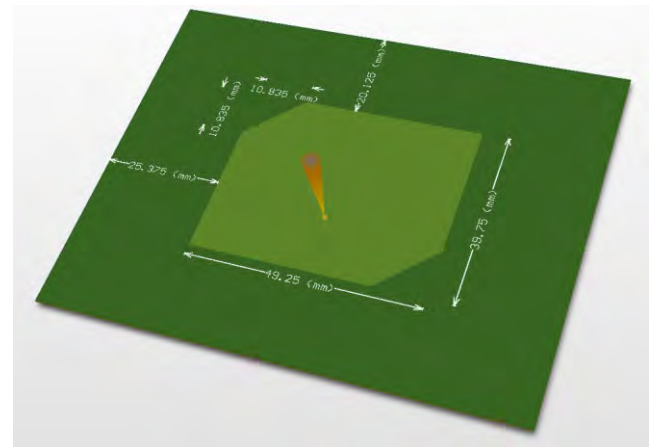


Figure 10: Microstrip antenna

Patch antenna dimensions	
Item	Dimensions (mm)
Patch Width	48.75
Patch Length	39.35
Antenna Width	97.5
Antenna Length	78.7
Antenna Thickness	1.82

Table 5. Microstrip patch antenna dimensions

The antenna was built on a ROGERS 6002 Substrate and simulated in CST Microwave Studio where a gain of 6.76 dB was obtained as shown in Figure 11, Also the antenna achieved a bandwidth of 132MHz.

Dish antenna (Ground station):

The dish antenna is from ISIS (Innovative Solutions in Space) and has the following characteristics:

ISIS Dish antenna	
Diameter	3 m
Gain	35.4dBi
Frequency	2.2-2.5GHz
Price	31000€

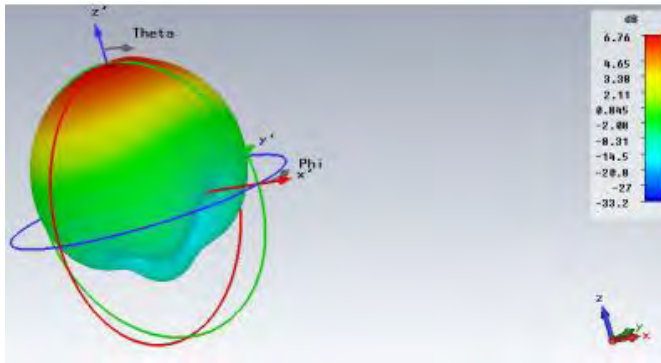
Table 6. Hispico transmitter

Figure 11: Microstrip Antenna Gain

Receiver Radio (Ground Station)

Figure 12: Dish antenna [5]

Hispico transmitter characteristics	
De-modulation	QPSK
Frequency	2.2-2.3GHZ
Data Rate	1.06 Mbit/s
Antenna Interface	TNC, Female 50 Ohm
Price	7800€

Table 7. Hispico Receiver [5]**3. CONCLUSIONS**

- The development of aerospace missions such as Libertad II, increase the skills and knowledge in the research field in Colombia
- Currently the university has already developed the prototypes of Command & Data Handling OBC (On board Computer), Electronic optical payload and the Power subsystem
- The generation and broadcasting of knowledge acquired in the execution of the satellite libertad 2 mission, promotes and servers as an example for other reasearch groups in Colombia
- The increasing strength of the aerospace industry in Colombia will decrease dependence

in this kind of technologies, such as foreign companies that sell images of the Earth's surface

4. BIBLIOGRAPHY

- [1] C. M. HERNÁNDEZ CALDERÓN , *Planteamiento de un Modelo para el Diseño del Software de Command And Data Handling Para el CubeSat Libertad 2*, Bogota, 2013.
- [2] AZUR SPACE, *30% Triple Junction GaAs Solar Cell*, 2010.
- [3] A. Farhat, J. Ivase, Y. Lu y A. Snapp, *Attitude Determination and Control System for CubeSat*, 2013.
- [4] S. Karki, *CubeCat-1 Communications System of a Nano-satellite*, 2013.
- [5] Wireless, IQ, *Highly Integrated S Band Transmitter for Pico and Nano Satellites*, 2011.

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA, DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN TRANSFORMADOR DE 1600 kVA

Efficiency analysis, design and manufacture of a transformer of 1600 kVA

RESUMEN

Los sistemas eléctricos de potencia son los encargados de transportar, transmitir y distribuir la energía eléctrica producida en las plantas de generación. Para realizar tal tarea de transporte de la energía se utilizan líneas conductoras y transformadores. Estos últimos son los encargados de elevar o disminuir la tensión para disminuir las pérdidas en el transporte. La importancia y el constante trabajo de estas máquinas eléctricas hace necesario un enfoque investigativo con respecto a su diseño, construcción y operación.

El diseño de máquinas tanto eléctricas como mecánicas, no se encuentra delimitado por un patrón exacto. Un diseño puede variar tanto como diseños puedan haber. La optimización de recursos y la búsqueda de los mejores procedimientos, e incluso las mejores dimensiones o parámetros, depende de cada diseñador. Este diseño encontró unas variables importantes que toman partido a la hora de buscar eficiencia.

Palabras clave: inducción electromagnética, ventana del núcleo, devanado, núcleo magnético.

ABSTRACT

The electrical power systems have the duty to transport, transmit and distribute the electrical energy produced in the electric plants, to perform that task of transport the electricity transport lines and transformers are used, the last are responsible for raising or lowering the voltage to reduce losses in the transport. The importance and the ongoing work of these electric machines require an investigative approach to design, construction and operation.

The design of electrical machines is no delimited and bordered with an exact pattern, a design can change as much as designs there are, the optimization of resource and the search by the best design procedure and included the best dimensions depends on each designer, this project found out any important variables which take importance when we are looking for efficiency.

Keywords: core's window, electromagnetic induction, magnetic core, Winding.

1. INTRODUCCIÓN

Los transformadores son máquinas eléctricas estáticas, que durante muchas décadas se han diseñado sobredimensionadas en algunos aspectos [1].

A la hora de realizar una optimización de un transformador, se puede buscar la modificación de su sistema eléctrico, magnético o de aislamiento. Para aumentar la resistencia de aislamientos frente a eventos como descargas eléctricas o variaciones en la tensión [2], esto se logra aumentando su sistema sólido de aislamiento. La implementación de aislamientos robustos entre los devanados y en núcleo, entre devanados, entre capas, e incluso entre la cuba y los devanados, provoca

una disminución en la transferencia de calor, ya que capas gruesas de aislante le quitan espacio al aceite y evitan la refrigeración de los devanados. A la hora de reducir las pérdidas en el núcleo, se reduce la sección del mismo, pero para lograr esto se suele disminuir la tensión por espiral, aumentando la cantidad de cobre a utilizar, debido a esto las pérdidas en el cobre se elevan.

La problemática frente al diseño de transformadores es bastante amplia, no es sencillo este diseño ya que está delimitado por varios factores como requerimientos térmicos que especifican las temperaturas nominales a las cuales debe operar, requerimientos dieléctricos en sus aislamientos conocidos como BIL (basic insulation level) y definidos por las normas colombianas [3], mecánicos

NIXON ÁLVAREZ

Ingeniero de diseño
construcciones y montajes
Electroductama Ltda.
Tesis de Ingeniería
Electromecánica.
Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia UPTC.
nixonandresalvarez@gmail.com

FERNANDO CONTRERAS

Ingeniero electricista.
Docente de planta
Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia
fernando.contreras@uptc.edu.co

con respecto a su estabilidad constructiva y necesidades estructurales, todas las anteriores están íntimamente relacionadas, haciendo que a la hora de que un parámetro se modifique los otros se verán directamente afectados.

Durante muchos años el diseño de transformadores se ha venido realizando por medio de análisis matemáticos, parámetros extraídos de guías gráficas, tablas y asumiendo diversos factores. Métodos que hoy en día se utilizan con éxito pero no optimizan en costos. En la bibliografía se encuentran diferentes libros que hablan del diseño de transformadores, algunos recientes y otros de varios años atrás [4], todos estos difieren del método de cálculo que se requiere ya sea porque los avances tecnológicos respecto a las láminas del núcleo [5], aislamientos o aceites así lo requieren. Los libros que hablan del diseño de transformadores difieren en cuanto a varias cosas y asumen otras para disminuir cálculos, algunas medidas incluso las asumen sin siquiera dar una explicación, de igual forma lo hacen con diversos parámetros.

Los costos de fabricación de un transformador se ven directamente relacionados con su eficiencia. Este es un problema constructivo, ya que si se logra un transformador de bajas dimensiones de igual forma su precio en materiales se reduce y sus pérdidas también.

Este artículo es el resultado del proyecto de grado definido como diseño y construcción de un transformador sumergido en aceite de 1600kVA 13,8/34,5kV Dyn5, el cual se desarrolló en la empresa Construcciones y Montajes Electroducta, empresa dedicada a la reparación y la fabricación de transformadores, subestaciones y redes eléctricas. Buscando como objetivo el diseño de transformadores más eficiente y económicos se inició el proyecto de grado ya mencionado.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de la efectiva investigación se tuvo que tener acceso a transformadores comerciales de los cuales se reparan y fabrican en la empresa. Estos son una referencia para conocer sus medidas, configuraciones, aislamiento, refrigeración y pérdidas a las cuales trabajan y ver la relación de cada una de sus características propias, ya que cuando las pérdidas de un transformador son altas de su sistema de refrigeración debe estar diseñado acorde, sus dimensiones y materiales de igual forma son acordes.

La investigación científica y técnica referente al diseño, construcción y funcionamiento de los transformadores fue plataforma de desarrollo en este proyecto. Tomando como guía bibliografía, expertos en el tema y técnicos expertos en la construcción de los transformadores, todo esto para comprobar teorías y estimaciones que a lo largo del proyecto surgieron.

Para la verificación de los resultados calculados se utilizaron herramientas informáticas como *solid edge*, en la que se verifica dimensionalmente como longitud, peso, volumen y resistencia mecánica del diseño. Para la verificación de esfuerzos eléctricos, transferencia de calor y pérdidas se utilizó Comsol *Multiphysics*. Para la obtención de los resultados se utilizaron tablas de cálculos dinámicas en Office Excel. La comprobación final se llevó a cabo físicamente con la prueba de los diferentes transformadores y el diseñado en este caso.

3. ANÁLISIS DE UN TRANSFORMADOR DE 1500KVA Y LA POSTERIOR VALIDACIÓN DE LOS DATOS

Durante el mes de febrero de 2014 se le realizaron pruebas de energización, de rutina y posteriormente se llevó a cabo el desensamble de un transformador de 1500kVA con configuración Dyn5, con tensiones de 34,5/13,8kV, a 60Hz y sumergido en aceite [6].



Figure 1 transformador de 1500kVA desensamblado.

A la par se realizaron los cálculos pertinentes que nos llevaron a su diseño, dimensiones y parámetros elegidos, con el fin de validar y analizar los cálculos utilizados, este mismo procedimiento se realizó con otros 8 transformadores de diferentes potencias, se tomó como referencia principal el transformador de 1500kVA ya que es el más cercano en similitud al que se diseñó de 1600kVA.

Durante el proceso del análisis de los cálculos se encontraron diversos parámetros que se valoraron y definieron como este artículo describe.

3.1. Cálculo del núcleo magnético

3.1.1 Determinación de la tensión por espira

Para potencias entre 100 y 150 MVA, los arrollamientos y los núcleos llegan a ser demasiado semejantes.

Para potencias mayores de 100 y 150 MVA, en este caso por los tamaños y por la facilidad de transporte se limitan dimensiones en sus núcleos y en sus arrollamientos, llegando a ser semejantes a los de 100MVA.

Para potencias relativamente bajas se utiliza muy comúnmente en varias bibliografías la siguiente ecuación con éxito, ya que para este caso en particular nos brindó la mayor aproximación posible en los diseños realizados:

$$E_t = k\sqrt{S_n} \quad (1)$$

E_t : Tensión por espira

S_n : Potencia aparente del transformador (KVA)

k : Constante que tendremos que elegir

Valores de k : Cobre entre 0,37 y 0,45; Aluminio valores entre 0,32 y 0,35

El factor k que este transformado maneja y otros a los cuales se les ha realizado el mismo estudio, se sale de los valores recomendados por la literatura, encontrándose un factor que oscila en $k=0,53$.

ANÁLISIS: esto indica que la tensión por espira que se utiliza es mayor y menor el número de espiras con relación a lo que sugieren los cálculos. Aunque las tensiones recomendadas por diferentes autores están ligadas a un k entre 0,37 y 0,45 en este caso particular y en otros transformadores no lo toman así. La variación en los valores oscila en tensiones por encima de las recomendadas, dejando como incógnita centro de nuestra investigación, las razones por las cuales se realizan estas modificaciones.

A mayor tensión por espira mayor tensión eléctrica entre las mismas y entre capas, llevando a la necesidad de mejores y utilizar aislamientos sólidos más robustos.

3.1.2 Inducción magnética

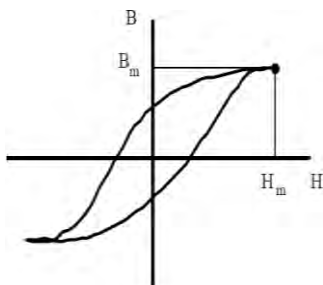


Figura 2: curva de histéresis del núcleo.

La determinación o estimación de la inducción máxima determina el área de la sección e indiscutiblemente afecta el costo de la máquina y su rendimiento. La inducción máxima (B_{mp}) estará determinada por las fluctuaciones en la red en la cual vaya a operar el transformador.

Un núcleo con material CRGO (chapa magnética laminada en frío de grano orientado) entra en saturación a partir de una inducción magnética de 1,9 T, si se presenta una alza en la tensión la corriente se desbocaría (efecto destructivo) [5].

La siguiente ecuación se utiliza con el fin de determinar esta máxima inducción que depende de α que es el porcentaje de variación de la tensión en la red:

$$B_{mp} = 1,9 / (1 + \alpha/100) \quad (2)$$

En los sistemas eléctricos de potencia sin variaciones significativas se reconoce un ($\alpha\%$) del 5% que da como resultado un valor de inducción máxima de 1,81 T.

Durante la comparación con nuestro transformador se encontró que su núcleo se encuentra diseñado para una variación en la red del 18%.

ANÁLISIS: varios de los transformadores analizados utilizan núcleos fuertes y amplios asumiendo variaciones de la tensión cercanas al 15%.

Asumir porcentajes del 15% para la variación de la tensión es bueno con respecto a la fabricación, ya que estará diseñado para soportar eventos de corta duración en los que se experimente una variación de tensión, como un corto circuito o una descarga atmosférica, debido a que poseen un núcleo robusto.

3.1.3 Sección del núcleo

Al determinar el núcleo nos encontramos con unas dimensiones aproximadas a las reales teniendo en cuenta las anteriores estimaciones que diferentes industrias consideran.

3.2 Aproximación del cálculo y el diseño al real

Se vio hasta el momento que los factores que se involucran en el diseño de un transformador no son camisa de fuerza a la hora de dimensionar dichas máquinas, dejando un margen demasiado amplio a la hora de diseñar.

Se llegó con una alta exactitud al modelo de 1500kVA como se muestran algunos de los muchos factores y dimensiones de un transformador en la ilustración 3 y en la tabla 1. La exactitud que se alcanzó nos permitió diseñar, construir y probar virtualmente diferentes modificaciones.

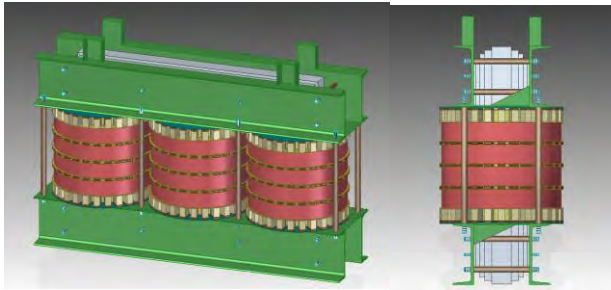


Figura 3 diseño del transformador desensamblado de 1500kVA, 13,8/34,5kV configuración Dyn5 a 60Hz.

El diseño que se muestra en la figura 3 se realizó teniendo en cuenta simulaciones de esfuerzos estáticos y cálculos transferencia de calor correspondiente al dimensionamiento de los ductos de refrigeración entre los devanados y los espaciamientos en los mismos [8].

Variable	Real	Calculado
Sección del núcleo	261mm	263mm
Espiras en baja tensión	388	380
Espitas en alta tensión	1680	1649
Altura de la ventana	495mm	495mm
Pérdidas en el cobre	12600W	12507,12W
Pérdidas en el hierro	1790W	1825W
Eficiencia	98%	98,61%

Tabla 1: comparación de algunas de las variables obtenidas en los cálculos contra las encontradas en el transformador real.

Luego del diseño y cálculos desarrollados en otros transformadores y con una serie de variables que la bibliografía no estandariza se inició la búsqueda del mejor y más apropiado diseño de transformador en términos de eficiencia, calidad y economía.

4 DISEÑO DE UN TRANSFORMADOR DE 1600KVA CON TENSIONES DE 13,8/34,5KV, DYN5 SUMERGIDO EN ACEITE

Este diseño se desarrolló basado en una tabla dinámica y gráfica de cálculo en Excel, en la cual se determinaron 36 variables de entrada como; potencia, tensión por espira, altura de la ventana, esbeltez del núcleo, esbeltez de los arrollamientos, tipo de láminas, niveles de aislamiento entre otras, para así calcular cualquier transformador de distribución en columnas.

El propósito fundamental de la tabla de cálculo es ver las variaciones de las características básicas de salida como pérdidas en el núcleo, pérdidas en los devanados, capacidad de disipación de calor de más.

Pudiendo analizar distintas variables críticas como se describen a continuación, a su vez mediante un hipervínculo con *solid Edge* nos entregará el diseño en

3D. La verificación de los resultados se realizó posteriormente con la ayuda de *Comsol Multiphysics*.

4.1 Tensión por espira

Se vio gráficamente que a medida que la tensión por espira aumenta los diferentes factores entran en juego, a mayores tensiones por espira la impedancia del circuito aumenta al igual que la resistencia, mejorando así su resistencia a cortocircuitos, reduciendo las corrientes durante estos eventos.

Las pérdidas por efecto joule disminuían a medida que se aumentaba la tensión por espira ya que es necesario menos cantidad de espiras. El cobre es el material más costoso de un transformador, así que de igual forma los costos totales disminuyen de la misma manera que las pérdidas.

Al aumentar la tensión por espira se vio que aumenta la inducción electromagnética del transformador haciendo que se necesite emplear una sección de núcleo mayor, un núcleo más robusto provoca unas pérdidas mayores y los costos por hierro aumentan.



Figura 5 variación de las pérdidas en relación a la tensión por espira.

Al haber mayor tensión por espira se presentó que la diferencia de potencial entre capas aumentaba proporcionalmente requiriendo niveles de aislamientos mayores y requiriendo el uso de aislamientos más robustos [8], para ello se realizaron una serie de pruebas de resistencia dieléctrica para determinar el calibre del papel aislante *presspan* diamantado o DDP como se ve en la figura 6 [9].



Figura 6 Prueba de rigidez dielectrica realizada a los materiales aislantes a usar.

4.2 Altura de la ventana

La altura de la ventana es una de las variables de las cuales no se encuentra información más que experiencias y apreciaciones empíricas, mediante modelos matemáticos se buscó la influencia de la altura de la ventana en el funcionamiento, en las pérdidas y en el costo del transformador.

En cuanto la ventana del núcleo o bien llamada altura de las columnas se reduce la geometría de los devanados encuentran el menor gradiente haciéndose lo más compactos posible y ocupando una menor área superficial para el mismo volumen de cobre, esta característica hace que muestren mayor rigidez y resistencia a la hora de presentarse un corto circuito. La cantidad de cobre utilizado en una ventana corta es bastante así que las pérdidas en el cobre y el costo aumentan.

De igual forma a medida que la ventana se iba aumentando las pérdidas en el cobre y el costo disminuían, ya que a mayor altura se necesitaba menor cantidad de capas de cobre, esta característica hace que el perímetro de cada espira sea menor y se necesite emplear menos cobre. La resistencia a una falla de corto circuito disminuye gradualmente con respecto a la altura de la ventana ya que más espiras en la última capa son susceptibles a descarrilarse.

A mayores alturas de la ventana la diferencia de potencial entre capas aumenta, y se incrementa el riesgo de descargas parciales entre capas, es por ello que se requieren mejores aislamientos aumentando los costos por aislamientos.

Las pérdidas en el hierro y en el cobre también se ven afectadas con la graduación de la ventana. Este proyecto centra su atención en optimizar la fabricación de transformadores, es por ello que hace bastante hincapié en las dimensiones, ya que es ahí donde la variación de la eficiencia se ve más pronunciada.

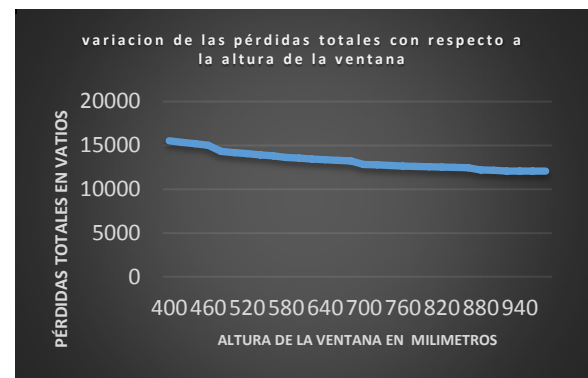


Figura 7 variación de las pérdidas totales con respecto a la variación de la altura de la ventana.

Basándonos en estas variaciones y limitados por las normas colombianas, que especifican las pérdidas máximas en los transformadores, se logró definir un punto de equilibrio en el cual las pérdidas totales son lo menor posible. Las pérdidas en el hierro no pueden superar los 2880 W para un transformador de 1600kVA, teniendo en cuenta esta limitante se llevó la ventana tan alto como fue posible sin superar estas pérdidas en el hierro, y de esta forma, se lograron disminuir las pérdidas en el cobre que son las más significativas, el diseño se implementó y los resultados se muestran en la siguiente tabla.

	Transformador de 1500kVA	Transformador de 1600KVA	Límite de pérdidas según la NTC819
Pérdidas en el Cobre	12600W	9380	17400
Pérdidas en el Hierro	1790W	2720W	2880
Pérdidas totales	14390W	12100W	20280
Rendimiento	99.02%	99.5%	-
Cantidad de alambre de Cobre	580kg	566kg	-
Peso del núcleo	1419kg	1507kg	-
Costo del Cobre en pesos colombianos	\$12'228.000	\$11'942.600	
Costo del Hierro en pesos colombianos	\$12'487.200	13'261.600	
Costo Total	24'715.200	25'204.200	

Tabla 2. Comparación de resultados entre el transformador de 1500kVA y el diseñado de 1600kVA.

CUBA

La cuba es el recipiente metálico en el cual se encapsula herméticamente toda la parte activa del transformador. Para este transformador, luego de una larga investigación, se encontraron dos tipos de cubas opcionales a utilizar. La primera fue una cuba de paredes planas y radiadores de paletas desprendibles y la segunda fue, una cuba de paredes con paneles corrugados como se muestra en la Figura 8, este tipo de cubas manejan un coeficiente de transferencia de calor mayor que la de los radiadores ya que el aceite incide en las paletas

libremente a través de su altura, requieren menor cantidad de material, dando así como resultado una cuba más liviana y, además, con mayor momento inercial que evita una posible inflamación del tanque.

Las cubas de paneles corrugados no son muy utilizadas en Latinoamérica ya sea por cultura o por falta de oferta de las mismas [10], por esta razón se tuvo que diseñar una cuba con radiadores.

La cuba con radiadores es muy efectiva para altas potencias cuando se necesita instalar ventiladores o bombas, para el efecto de este proyecto se diseñó y fabricó una cuba de radiadores como se ve en la figura 8.

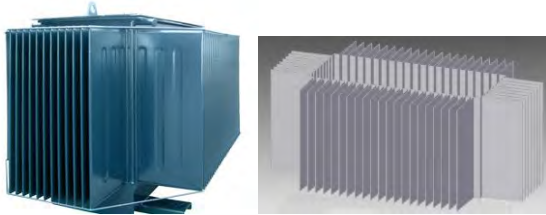


Figura 8 cubas con paredes de paneles corrugados.



Figura 9 cuba de radiadores

Para la obtención de las dimensiones y las especificaciones se utilizaron diversos métodos matemáticos de transferencia de calor, y se corroboraron con simulaciones térmicas de elementos finitos.

5 DISEÑO RESULTANTE

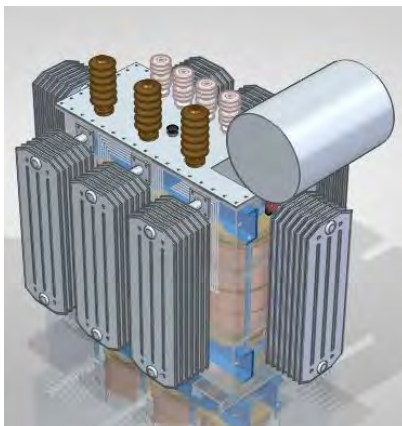


Figura 10 Diseño final del transformador de 1600kVA.

El sistema de refrigeración se hace más eficiente mientras que la altura aumenta ya que se obtiene mayor área

efectiva para la transferencia de calor, estos datos los constata las tablas de cálculo del proyecto.

En este momento nos encontramos en la etapa de pruebas de fabricación del transformador que tardará cerca de dos semanas y a finales del mes de julio se espera ya haberle realizado las pruebas de certificación para iniciar su fabricación en serie y su posterior comercialización [11].

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La altura de la ventana, que era un variable sin definir, se puede relacionar directamente con las pérdidas totales y las máximas permitidas en el hierro, llevándola a un valor exacto y no a un sinfín de posibilidades, la altura de la ventana también se ve relacionada con un mayor rendimiento y una significativa reducción de costos.

Para realizar un diseño tomando en cuenta esta investigación, se recomienda tener en cuenta que el sistema de aislamiento es el que se ve seriamente afectado con estas modificaciones, y se requieren niveles de aislamiento mayores, para ello se deberá hacer un análisis riguroso del diseño en cuanto a la rigidez eléctrica para poder dimensionar los aislamientos sin ver afectada la refrigeración.

7. BIBLIOGRAFÍA

Referencias de libros:

- [1] Proyecto fin de carrera *Diseño de un transformador de 5MVA, 33/11kV Dyn11*. Universidad Carlos III de Madrid-escuela politécnica superior-departamento de ingeniería eléctrica. Leganés 3 de Diciembre de 2009.
- [2] CULCYT. *Diseño, construcción y pruebas de un transformador de poca capacidad* M.C. Onofre A. Morfín Garduño¹, M.I. David García Chaparro², M.I. Gabriel Bravo Martínez³. Agosto del 2005.
- [4] STEVENSON, William D. *Análisis de sistemas de potencia*. Mexico Mcgraw Hill 1996.
- [8] Corrales Martin, j. *Teoría, calculo y construcción de transformadores* Editorial Labor, SA 1957 Barcelona Madrid.

Empresas:

- [5] Empresa _ Frana International S.A.S tocancipá-Cundinamarca. Disponible en web: <http://www.franainternational.com/>.
- [6] empresa colombiana Grupo económico magnetron. Políticas de la empresa, disponible en web: <http://www.magnetron.com.co/magnetron/>.
- [10] Empresa constructora de transformadores Tracol campo de operación, productos y coverture disponible en web: <http://www.tracol.com.co/web/>.

Normas:

- [3] Norma Técnica Colombiana NTC 836 Electrotecnia. *Niveles de aislamiento y ensayo para transformadores sumergidos en líquido refrigerante* 1998-04-22. Tercera actualización 2011-03-05. Editada por ICONTEC.

- [7] Norma Técnica Colombiana NTC 837 *ensayo del dieléctrico* 1997-09-17. Tercera actualización 2011-03-05. Editada por el instituto colombiano de normas técnicas (ICONTEC) apartado 14237 Santafé de Bogotá, DC. Primera actualización.
- [9] ANSI. IEEE C57.12.00 *standard for general requirements for liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers* New York. NY 10016-5997, USA. 10 de September de 2010.
- [11] *Reglamento técnico de instalaciones eléctricas – RETIE*. Resolución número 180398(7 de abril de 2004).

SIMULACIÓN DE MANIOBRAS EN BANCOS DE CONDENSADORES

Simulation of capacitor banks operation

RESUMEN

Las maniobras de cierre o apertura de bancos de condensadores implican, por lo general, la presencia de sobretensiones y corrientes transitorias serias [1]. Cuando el banco de condensadores se desenergiza, la tensión transitoria de recuperación (TVR) puede alcanzar un valor de varias veces en p.u. de su valor nominal [2]. De la misma manera, cuando se energiza el banco las corrientes transitorias pueden alcanzar valores pico muy por encima de los valores nominales. Estas corrientes y tensiones transitorias toman valores más críticos si el cierre o la apertura de las fases se hace a tiempos desiguales, y también cuando se presentan reencendidos.

Palabras clave: bancos de condensadores, maniobras, reencendido, transformadores.

ABSTRACT

Close or open operations in capacitor banks generally involve the presence of surges and serious transient currents [1]. When the capacitor bank are de-energized, the transient recovery voltage (TRV), can reach a value of several times in pu of their nominal value [2]. Likewise when the bank is energized; transient currents can reach peak values above the nominal values. These currents and transient voltages take critical values if the phases closing or opening is unequal times, and also in the re-ignition case.

Keywords: capacitor banks, operations, re ignition, transformers.

CARLOS ANTONIO GÓMEZ V.

Ingeniero electricista, M. Sc (c).
Profesor
Universidad Central
cgomezv1@ucentral.edu.co

HENRY GIOVANNI PINILLA R.

Ingeniero electricista, M. Sc (c).
Profesor
Universidad Central
hpinillar@ucentral.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Los bancos de condensadores son utilizados en subestaciones de baja y media tensión donde es necesaria la compensación de pérdidas de potencia reactiva que consumen cargas tales como bombillas o motores eléctricos. La compensación de energía reactiva mediante bancos de condensadores ayuda a disminuir las caídas de tensión, a minimizar las pérdidas de energía, a ampliar la capacidad de transmisión de potencia activa e inclusive a filtrar armónicos [3].

El diseño y dimensionamiento del banco de condensadores se realiza de acuerdo al suministro de carga y a los resultados del estudio de calidad de energía. Sin embargo, es de especial atención las maniobras asociadas al banco tales como el encendido, desconexión y el reencendido [3], puesto que tales maniobras producen eventos transitorios que pueden resultar perjudiciales para el funcionamiento del sistema completo.

2. CONTENIDO

2.1. Sistema simulado

El estudio y análisis de las maniobras en bancos de condensadores se realizó en base a la simulación en el programa ATP (*Alternative Transient Program*) [4], sobre un circuito típico de alimentación de media tensión. El esquema general del circuito se puede apreciar en la figura 1.

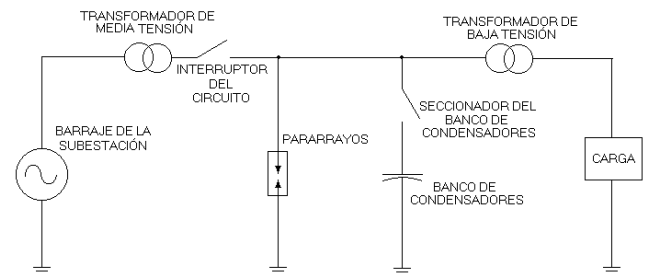


Figura 1. Esquema general del circuito simulado.

Para explicar el procedimiento de simulación y de cálculo [5], tomaremos como ejemplo el circuito de media tensión que tiene las siguientes características:

- Transformador Mitsubishi 30MVA, 115/11.4KV
- Tensión nominal de circuito 11.4KV
- Banco de condensadores Cooper de 1200Kvar
- Corriente pico del circuito 100 A

Para esta simulación no se tomó en cuenta la topología de la red y se consideró una carga con parámetros concentrados, posteriormente se utilizará la subrutina *Line Constants* [6] del programa ATP para simular la red.

La siguiente simulación es una demostración de la forma como utilizar el programa ATP (*Alternative Transient Program*) como herramienta para analizar los efectos transitorios que se presentan en redes eléctricas [7], en este caso vamos a analizar el efecto que tienen algunas maniobras de bancos de condensadores sobre una red de distribución y los elementos que componen esta red [8]. Para explicar los pasos de la simulación y para mostrar cómo se obtienen los parámetros de los elementos a simular se tomará como ejemplo un circuito de media tensión que tiene las características mencionadas anteriormente.

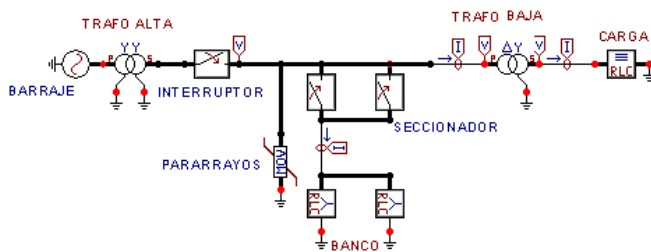


Figura 2. Esquema de simulación en ATP.

En la simulación se utilizó una fuente trifásica sinusoidal para representar al barraje de alta tensión con una secuencia de fases positiva y cero ángulo de desfase.

a. Transformador de la subestación

Los datos del transformador y las pruebas del mismo son los siguientes:

Transformador Mitsubishi 22.5/30 MVA, 115/12 KV, 151/1440 A

• Prueba de corto circuito

Potencia base	30 MVA
Posición cambiador de tomas	115/12 KV
Corriente de corto circuito (Icc)	151 A
Tensión de corto circuito (Vcc)	4,7 KV
Pérdidas en corto (Pcc)	61,51 KW
Impedancia de corto circuito	12,79%

• Prueba de vacío

Potencia base	30 MVA
---------------	--------

Tensión de vacío (Vo)	12 kV
Corriente media de vacío (Io)	0,15%
Pérdidas en vacío (Po)	14,92 KW
$I_o = 0,15\%I_n = 0,0015 \cdot (1440) = 2,17 \text{ A}$	

• Cálculo de parámetros

Resistencia de magnetización (Rmag):

$$R_o = \frac{V_o^2}{P_o}$$

$$R_o = \frac{(12000)^2}{3 \cdot 14920} = 3217,16 \, \Omega \quad (1)$$

Dado que para estas pruebas se utilizó una tensión base de 12 kV, pero el sistema trabaja con una tensión nominal de 11,4 KV se debe hacer el cambio de base de la siguiente manera:

$$R_o = 3217,16 \cdot \left(\frac{12}{11,4} \right)^2$$

$$R_o = 356472 \, \Omega \quad (2)$$

La corriente de magnetización está dada por la prueba de circuito abierto. Con el cambio de base tenemos:

$$I_o = 2,17 \cdot \left(\frac{12}{11,4} \right)^2 = 2,4 \text{ A} \quad (3)$$

El flujo de magnetización (Fo) define la inductancia de la rama de magnetización y se puede calcular aproximadamente por:

$$F_o = \frac{(V_{rms})}{2\pi f}$$

$$F_o = \frac{(11400)}{120\pi} = 30,24 \text{ V} \cdot \text{s} \quad (4)$$

De los datos de la prueba de corto circuito se obtienen los parámetros de las ramas de dispersión de los devanados. Visto desde el lado de alta se tiene:

$$Z_n = \frac{115000}{\sqrt{3} \cdot 151} = 439,7 \, \Omega$$

$$Z_{cc} = 439,7 \cdot 12,79\%$$

$$Z_{cc} = 56,24 \, \Omega$$

$$R_{cc} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} = \frac{61510}{151^2} = 2,69 \, \Omega \quad (5)$$

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2} = \sqrt{56,24^2 - 2,69^2} = 56,17 \, \Omega$$

$$L_{cc} = \frac{X_{cc}}{2\pi f} = \frac{56,17}{120\pi} = 149 \text{ mH}$$

Para obtener los parámetros del transformador dividimos la impedancia entre ambos devanados y así obtenemos:

$$\begin{aligned}
 R_p &= 1,3488 \, \Omega & R_s &= \frac{1,388}{a^2} = 0,01325 \, \Omega \\
 L_p &= 74,5 \, mH & L_s &= \frac{74,5}{a^2} = 0,7321 \, mH
 \end{aligned} \quad (6)$$

En el presente caso de simulación no se incluyó la característica de saturación o magnetización del núcleo puesto que estas curvas son importantes cuando los transformadores pueden entrar en saturación muy fácil tal como en los transformadores de medida. En el caso de un transformador de potencia esta característica suele no tomarse en cuenta [9].

b. Banco de condensadores

Este elemento se representó como una carga RLC trifásica conectada en estrella, en donde se igualan a cero los valores de R y L para representar el banco de condensadores [3].

Potencia reactiva del banco 1200 kVA.
Tensión nominal 11,4 kV

$$\begin{aligned}
 X_c &= \frac{(V_n)^2}{P} = \frac{(11,4)^2}{1200} = 1083 \\
 X_c &= \frac{1}{\omega C} \\
 C &= \frac{1}{120\pi * X_c} = \frac{1}{4082814} \\
 C &= 24,5 \, \mu F
 \end{aligned} \quad (7)$$

Como todos los condensadores, estos bancos también poseen una resistencia propia que se puede representar como una resistencia en paralelo con el banco. Para bancos de condensadores de media tensión esta resistencia se especifica con un valor tal que al cabo de 5 minutos después de des energizarse, la tensión sobre el banco debe ser menor de 50 V. Dados estos valores de tiempo tan extensos, la resistencia no tiene mucho peso en un análisis de transitorios como el que estamos llevando a cabo. El valor de esta resistencia para el banco de 1200 kVAR es de 2 MΩ.

c. Transformador de distribución.

Para este modelo de transformador se requiere al igual que en el modelo de transformador anterior las prueba de vacío y de corto circuito [9]. Adicionalmente se consideró una conexión DY5 típica en transformadores de distribución.

La carga total del circuito se representó mediante un elemento RLC de parámetros concentrados. Para calcular los valores de la carga se consideró lo siguiente.

Corriente del circuito 100 A
Factor de potencia 0.9
Relación de transformación (RT) 11400/120= 95

En el caso del factor de potencia se tomó un valor típico para un circuito de distribución urbana, en cuanto a la corriente se tomó el valor a una hora en donde se presente la demanda pico (11:00 am). El cálculo se realizó de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 I_s &= \frac{RT}{\sqrt{3}} * I_p = \frac{95}{\sqrt{3}} * 100 = 548482 \, A \\
 Z_{LOAD} &= \frac{V_s}{I_s} = \frac{120}{548482} = 0,02187 \, \Omega \\
 \cos^{-1}(0.9) &= 25,84^\circ \\
 R_{LOAD} &= Z_{LOAD} * \cos(25,84^\circ) = 0,01969 \, \Omega \\
 X_{LOAD} &= Z_{LOAD} * \sin(25,84^\circ) = 0,009536 \, \Omega \\
 L_{LOAD} &= \frac{X_{LOAD}}{120\pi} = 0,0253 \, mH
 \end{aligned} \quad (8)$$

2.2. Simulaciones

El objetivo del estudio es analizar las maniobras que se realizan sobre los bancos de condensadores, el estudio se ha enfocado hacia las maniobras de energización, aperturas monofásicas, trifásicas y aperturas de los polos a destiempo. Como primera medida, analizaremos las maniobras de apertura.

a. Maniobras de apertura

- Apertura de una sola fase del seccionador

En las maniobras de apertura de bancos de condensadores, generalmente se presentan sobretensiones sobre los polos del seccionador, estas pueden tomar valores de varias veces por unidad. Para analizar qué tan graves pueden ser estas sobretensiones se deben simular varios casos que se puedan presentar. El primer caso a simular es la apertura de un solo polo del seccionador, para tal fin se le dará orden de apertura al polo A en el instante en que el valor de la tensión sobre esta fase sea un valor pico, es decir, a los 16,66 ms. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

b. Tensiones del circuito

Se puede apreciar que la apertura del polo A del seccionador del banco de condensadores no tiene un gran efecto sobre las tensiones de línea, en ambos casos la tensión tiene un transitorio que alcanza a tener un par de kilovoltios. En la figura 3 se muestra el transitorio que se presenta en las líneas.

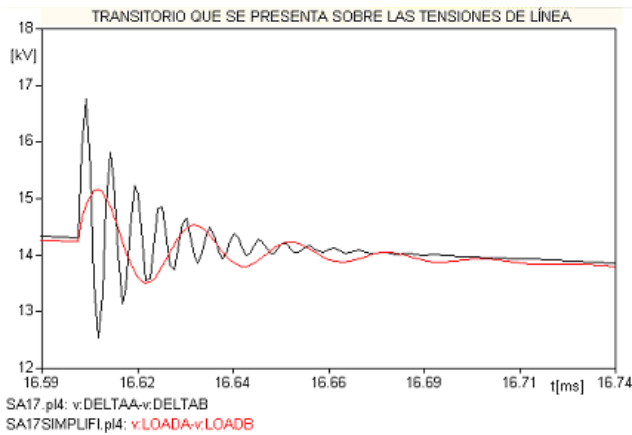


Figura 3. Sobretensión producida por la apertura de una sola fase del seccionador.

En la figura 4 se muestra la tensión que se presenta sobre el polo A del seccionador. La tensión se incrementa hasta llegar a un valor de aproximadamente 2 p.u. y, al igual que en las tensiones de línea, se presenta un transitorio muy rápido de algunos kilovoltios. De esta forma, vemos que en los casos de desenergización de bancos de condensadores los principales esfuerzos por sobretensiones se van a presentar sobre el seccionador del banco.

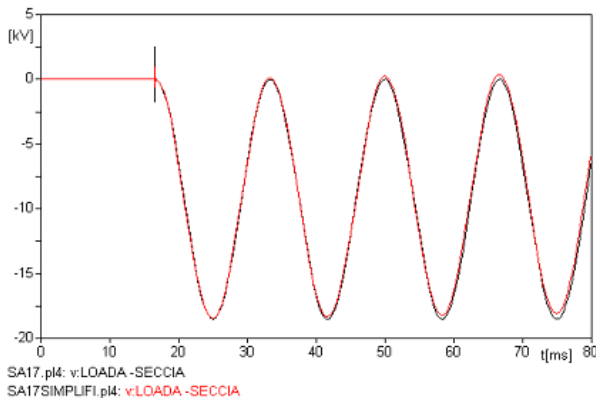


Figura 4. Tensiones sobre el polo A

c. Corrientes en el circuito

En la figura 5 se observa el efecto que tiene el banco de condensadores sobre el circuito, ya que la corriente que demanda el circuito es de 100 A, y como se nota en la figura, la fuente suministra una corriente de alrededor de 91 A, es decir, el banco de condensadores está aportando casi el 10% de la corriente del circuito. Los resultados de la simulación muestran que la desenergización del banco de condensadores no afecta en forma alguna a las corrientes en el lado de baja tensión del transformador.

- Apertura trifásica del seccionador

Para este segundo caso, se hizo una apertura total del seccionador del banco en donde todos los polos se abren en el mismo instante.

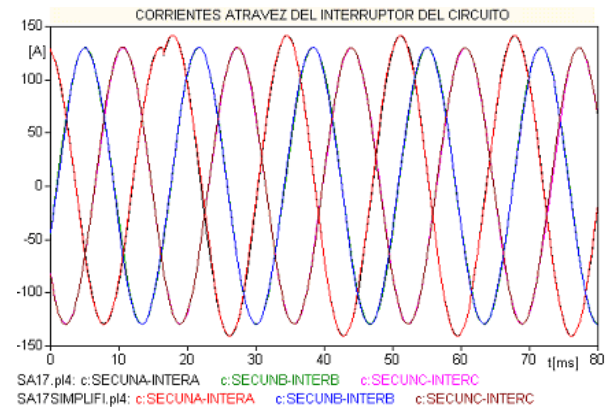


Figura 5. Corrientes en el circuito

d. Tensiones en el circuito

Cuando se presenta una apertura trifásica, figura 6, las tensiones de línea presentan unos transitorios que alcanzan una amplitud considerable pero de una duración muy corta y una frecuencia elevada. Como en el caso de apertura monofásica, figura 7, en este caso las sobretensiones más grandes se presentan sobre los polos del seccionador. Pero ahora, tratándose de un caso trifásico, las tensiones de línea sobre el seccionador van a

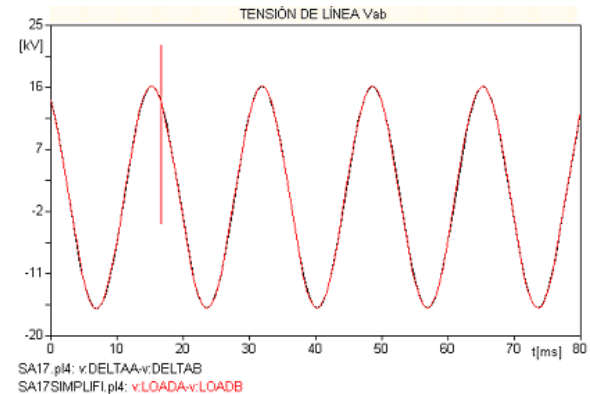


Figura 6. Sobretensión producida por una apertura trifásica.

ser las de mayor amplitud. Esto se produce porque al producirse una apertura del banco, este queda cargado a cierta tensión dependiendo del momento de la apertura. Entonces sobre el seccionador se presenta una tensión que corresponde a la diferencia entre la tensión de línea y la tensión a la que queda cargado el condensador, como la tensión del condensador después de la apertura es prácticamente DC, entonces la diferencia de potencial que aparece sobre el seccionador es la tensión de línea montada sobre una tensión DC.

En el caso de apertura de los tres polos al mismo tiempo, figura 6, las tensiones que aparecen sobre cada polo del seccionador del banco tienen una amplitud y una fase diferente y, por consiguiente, las tensiones de línea o polo a polo del seccionador pueden llegar a alcanzar

valores bastante elevados dependiendo del instante en que se realice la apertura.

e. Corrientes en el circuito

En los casos de desenergización de bancos de condensadores, las corrientes que llegan a la carga se mantienen constantes tanto antes como después de la desenergización del banco, esto se debe a que la corriente que estaba suministrando el banco es asumida por la fuente inmediatamente después que el banco ha salido. De otro lado, la corriente que suministra la fuente de alimentación si se ve afectada y presenta un comportamiento muy similar al comportamiento registrado en el caso anterior (apertura monofásica) sin embargo aquí vemos que se producen transitorios sobre las fases B y C.

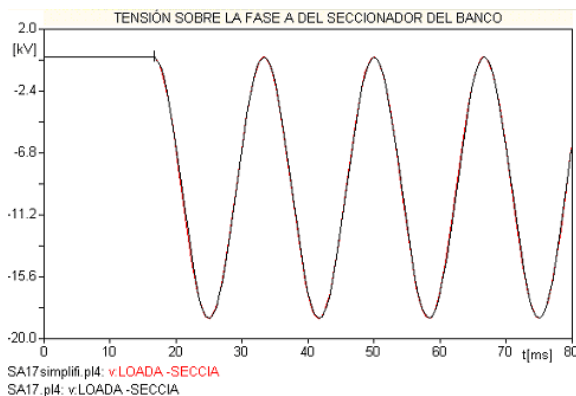


Figura 7. Sobretensión producida en la fase A del seccionador del banco de condensadores

Los transitorios sobre las fases B y C se producen porque la corriente debe cambiar su ángulo de fase en forma más violenta que sobre la fase A. Por tal motivo, cuando se realiza una maniobra en un banco de condensadores y el instante de la maniobra recae sobre alguna pendiente de la onda, la producción de transitorios es muy alta. De aquí también se deduce por qué sobre la fase A no se producen transitorios ni sobrecorrientes tan evidentes, ya que la maniobra se realiza cuando esta onda se encuentra sobre su valor pico.

- Apertura trifásica a destiempo

Los tiempos de apertura se eligieron de forma que se presentaran los valores más altos en los transitorios sobre los polos del seccionador.

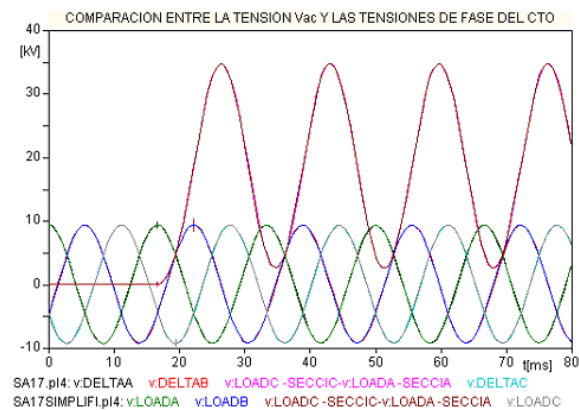


Figura 8. Tensiones generadas en la apertura a destiempo del banco de condensadores.

Los tiempos corresponden al valor pico de las tensiones de fase del circuito, es decir, al cortarle la tensión al banco de condensadores en estos tiempos el banco queda cargado a una tensión correspondiente al valor pico de la señal de fase del circuito, figura 8. De la misma forma, la tensión que aparece sobre el seccionador es la tensión de fase del circuito montada sobre la DC correspondiente a la tensión que queda en el banco de condensadores, y si esta es la más alta que se puede obtener, por consiguiente las tensiones de fase del seccionador también serán las más altas que se puedan conseguir.

Lo más importante de seleccionar los tiempos de apertura del seccionador es que las tensiones entre algunos de los polos resultan ser muy altas. Así, por ejemplo, las tensiones Vbc y Vca pueden llegar a alcanzar un valor de aproximadamente 4 p.u.

f. Corrientes del circuito

Como se dijo anteriormente, las corrientes que llegan a la carga no sufren cuando se saca el banco de condensadores, las corrientes que sí sufren por esta maniobra son las que suministra la fuente, en este caso las corrientes de alimentación aumentan su amplitud y cambian su ángulo de fase con la maniobra, sin embargo no hay presencia de transitorios, esto dado a que los tiempos de corte corresponden a los valores pico de la onda y, por consiguiente, la presencia de transitorios disminuye.

Como hemos visto la desenergización de bancos de condensadores tiene un efecto muy notable sobre el seccionador del banco, de los resultados anteriores es claro que el modelo simulado funciona bien cuando se trata de maniobras de desenergización de bancos.

A continuación, en la figura 9, se realizará la simulación teniendo en cuenta las pérdidas y el efecto de la línea de media tensión, el circuito es el siguiente:

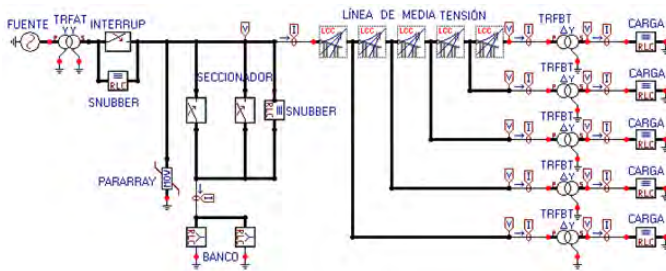


Figura 9. Circuito simulado considerando las líneas del sistema de distribución.

En este segundo caso se simularon cinco tramos de una línea de media tensión [10], y se dividió la carga en partes iguales con el fin de simplificar el modelo.

- Apertura monofásica del seccionador

Puede notarse que los resultados obtenidos con este segundo modelo figuras 10, 11 y 12, son similares a los resultados que arroja la simulación considerando los parámetros concentrados. Sin embargo, es claro que un modelo más completo de las líneas produce una mayor oscilación en el caso de la desconexión del banco.

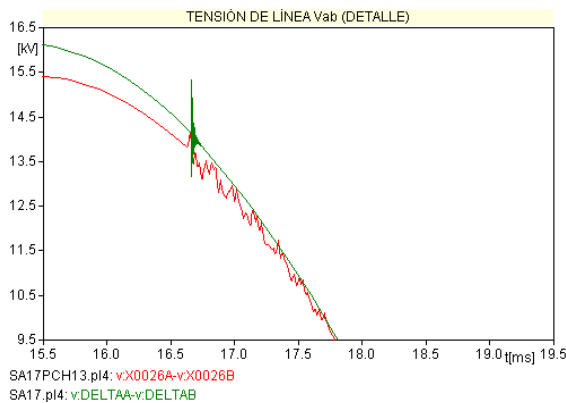


Figura 10. Tensión en la línea AB producida por la apertura monofásica del seccionador

- Apertura trifásica del banco de condensadores

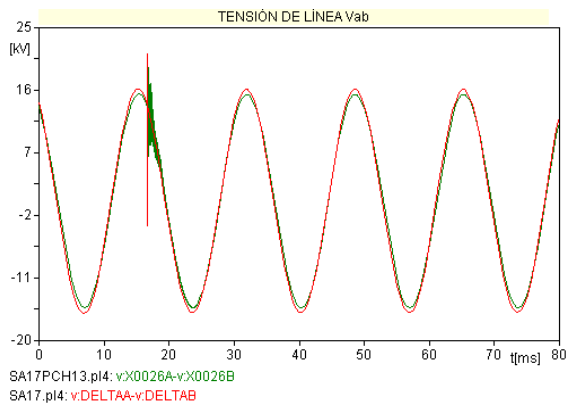


Figura 11. Tensión en la línea AB producida por la apertura trifásica del seccionador

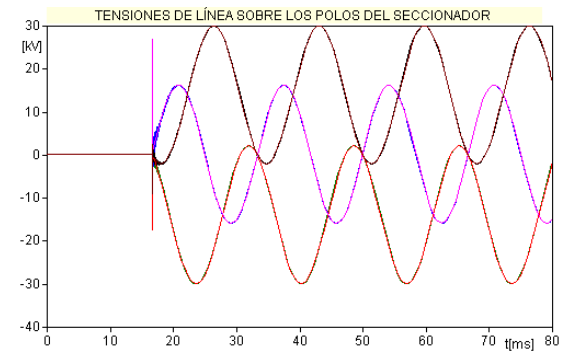


Figura 12. Sobretensiones en los polos del seccionador producidas por la apertura trifásica del seccionador

3. CONCLUSIONES

Se encontró que las sobretensiones de mayor amplitud se presentan sobre los polos del seccionador del banco de condensadores, mientras que las tensiones de línea presentan efectos transitorios muy rápidos y de tensiones reducidas.

Las tensiones de línea sobre el seccionador son de mayor amplitud porque el banco queda cargado a cierta tensión dependiendo del momento de la apertura. Entonces, sobre el seccionador se presenta una tensión que corresponde a la diferencia entre la tensión de línea y la tensión a la que queda cargado el condensador.

En los casos de desenergización de bancos de condensadores, las corrientes que llegan a la carga se mantienen constantes tanto antes como después de la desenergización del banco, esto se debe a que la corriente que estaba suministrando el banco es asumida por la fuente inmediatamente después que el banco ha salido.

La magnitud de los transitorios producidos en las señales de tensión y de corriente, dependen en gran medida al instante donde se produce la apertura del interruptor.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Watson N., J. Arriaga, *Power systems electromagnetic transient simulation*, IEE London, 2003
- [2] Zamora M, Mazón A, Fernández E. *Simulación de sistemas eléctricos* Prentice Hall, Madrid 2005.
- [3] Grebe, T.E. Gunther, E.W. *Application of the EMTP for analysis of utility capacitor switching mitigation techniques*, Harmonics and Quality of Power Proceedings, 1998. Proceedings. 8th International Conference On. Pages 583 - 589 vol.1.
- [4] Prikler, László, Hoidalén, Hans Kr. *ATPDraw user's manual*. SINTEF Energy Research. Norway 2009.
- [5] Ramírez L. Cesar, Gómez V. Carlos, Arias R. Jairo, López S. Henry, Roman C. Francisco. *Modelamiento*

- de protecciones utilizando ATP*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá 2008.
- [6] Dommel H. W., Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiphase networks, *IEEE Transactions on Power App and Systems*, vol. PAS 88, no. 4, April 1969, pp. 388-399.
 - [7] Cardona C, Leonardo. *Teoría y práctica con el ATP*. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de electricidad y electrónica. Medellín 1995.
 - [8] Martínez J. A., Gustavsen B., Durbak D., Parameter determination for modeling system transients—part I: overhead lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, No. 3, July 2005, pp. 2038-2044
 - [9] Martínez J. A., Walling R., Mork B. A., Martin-Arnedo J., Durbak D., Parameter determination for modeling system transients—part III: transformers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, No. 3, July 2005, pp. 2051-2062.
 - [10] Hevia Orlando. *Comparación de los modelos de línea del ATP*. Argentina marzo 1999.

CÁLCULO DE TRAYECTORIAS PARA PREAGARRE DE UN EFECTOR FINAL MEDIANTE VISIÓN DE MÁQUINA

Calculation of trajectories for pre-grasping of an end effector through the machine vision

RESUMEN

Mediante un dispositivo de visión 3D, sujeto al efector final de un manipulador de la empresa Mitsubishi, se logró realizar una reconstrucción tridimensional del espacio de trabajo, y dentro de este se ubicó una figura geométrica que el robot identifica y detecta en qué parte del espacio de alcance se encontraba dicho elemento. A continuación, teniendo el punto inicial y final de la trayectoria del robot, se logró un planeador de trayectorias del manipulador mediante una técnica de optimización conocida como aproximación Chevyshev, definiendo una función matemática, orden de dicha función y un número de puntos para construir la trayectoria. Finalmente, después de tener definido todo lo anterior, se generó el código de movimiento del robot.

Palabras clave: reconstrucción 3D, visión de máquina, robótica.

ABSTRACT

Using a 3D vision device grabbed to the end of the effector of a MITSUBISHI robot, it was possible to make a three-dimensional reconstruction of its workspace and within this a geometric figure was situated, the robot identified the position of the object. Then having the start and end point of the trajectory of the robot, it was achieved a trajectory planner for the manipulator using a optimization technique known as Chevyshev approximation, defining a mathematical function, its order and a number of points to build the trajectory. Finally, after having defined the above, code was generated robot motion.

Keywords: 3D Reconstruction, Machine vision, Robotic.

1. INTRODUCCIÓN

La integración de la robótica de manipuladores con la visión artificial, o visión de máquina, ha tenido un gran auge en aplicaciones industriales en los últimos tiempos. Dar la opción a un manipulador de detectar su entorno tridimensional y brindarle la posibilidad de ser entrenado para tomar decisiones, según el espacio que lo rodea, son tareas que toman importancia en el ambiente industrial.

Lograr la reconstrucción 3D de objetos reales da la posibilidad de aumentar el número de aplicaciones y permite disminuir el riesgo ante colisiones que un robot puede sufrir con su entorno, lo anterior en razón a que se tiene la posibilidad de tener información más detallada de un espacio de trabajo.

El trabajo que se presenta tiene como propósito principal, la utilización de un dispositivo de visión 3D (*Prime Sense Camire 1.09*), integrado a un robot de la compañía Mitsubishi (RV-6SQL), para lograr una toma de decisión en función de su ambiente o espacio de trabajo.

MAURICIO F. MAULEDOUX.

Ingeniero mecatrónico, Ph. D.
Universidad Militar Nueva Granada
mauricio.mauledoux@unimilitar.edu.co

ÓSCAR F. AVILÉS.

Ingeniero electrónico, Ph. D.
Profesor Titular
oscar.aviles@unimilitar.edu.co

ALEXIS Y. GHISAYS

Ingeniero mecatrónico.
Universidad Militar Nueva Granada
alexisghisaysabril@gmail.com

JOAO M. ROSARIO

Ingeniero mecánico. PhD
Universidad Estatal de Campinas
rosario@fem.unicamp.br

Un problema que aparece en tareas de montaje de piezas para lograr un ensamble es determinar la trayectoria que se debe seguir para alcanzar un punto en el espacio con la orientación adecuada de manera que el objeto a ser manipulado pueda ser agarrado de manera estable por el efector final. A esta aproximación se le denomina preagarre que es problema de lograr aproximarse de un objeto a ser manipulado. Industrialmente se utilizan varios robots manipuladores para el ensamble y desensamble, y es muy importante no solo enfocarse en la sujeción de un elemento en particular, sino en la trayectoria para el preagarre de este.

La mayoría de los desarrollos en los que se mancomuna el tema de visión de máquina con el tema de robots manipuladores, se enfocan en sujetar distintos elementos sin importar la trayectoria del robot ni cómo este se acerque al objeto.

Existen innumerables campos del conocimiento en los cuales el tema de visión artificial y tratamiento de imágenes son totalmente aplicables y aún más sabiendo

podían evidenciar de la siguiente manera:

```

cilindro3: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
solid vcg
facet normal -0.244454 -0.967885 0.0586503
outer loop
vertex -206.935 9.30563 -70.2333
vertex -202.252 8.26159 -67.9472
vertex -206.938 9.37823 -69.0504
endloop

```

Figura 3. Formato STL en bruto.

Los valores numéricos después de la palabra "vertex" hacen referencia a las coordenadas deseadas así: vertex *coordenada X coordenada Z, coordenada Y*. Los valores después de "facet normal" fueron ignorados debido a que no se encontró ninguna relación con el modelo virtual del objeto real, además que siempre presentaban valores entre 1 y -1, lo que ayudo a que posteriormente mediante programación, filtrar estos valores y así pudieran ser eliminados. El subvi construido en LABVIEW que permitió la clasificación de los valores X, Y y Z fue el siguiente:

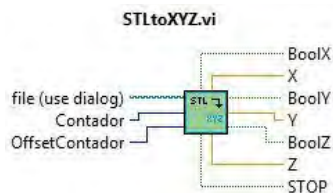


Figura 4. Subvi STLtoXYZ.

El diagrama de bloques de este *subvi* se mostrará en la sección de anexos para mejor entendimiento. A este bloque se le definieron 3 entradas y 7 salidas que corresponden a:

- file: Indica la dirección donde se encuentra el archivo STL.
- Contador: Va conectado, en el programa principal, al contador i de la estructura *while*. Este valor indica la línea de texto que el programa evaluará para identificar y separar los valores X, Y y Z.
- Offset Contador: Este valor se le introdujo al programa por razones de tiempo de proceso. Al correr el programa con este valor en 0, se encontró que demoró alrededor de 1 minuto en identificar todas las muestras del archivo STL y además se observó que eran alrededor de 35000 muestras y que los valores de Z, que son los más importantes, se guardaban al final de estas muestras. Es debido a esto que para agilizar el programa es ideal inicial el contador en un valor como 20000 o 25000, ignorando estos primeros datos.
- Bool X, Y y Z: Indican si cada valor se encuentra dentro del rango -1 y 1. Si se encuentra en este rango estos valores serán 0, en caso que no se encuentre en este rango estos valores serán 1.
- X, Y y Z: Indicadores de los vectores numéricos que posteriormente almacenarán consecutivamente

dicha información. De manera sencilla, lo que el programa hace es identificar la ubicación del archivo STL, leerlo, y línea por línea elimina palabras reservadas del formato como lo son "vertex" y "facet normal", dejando así solo valores numéricos fuera del rango -1 y 1, que serán almacenados en vectores X, Y y Z por aparte. Esta clasificación de coordenadas en vectores X, Y y Z se mostrara más detalladamente en la sección de anexos, mediante su respectivo diagrama de bloques. Las imágenes obtenidas y modelos reconstruidos se mostraran en el capítulo de resultados y análisis de resultados. Teniendo el modelo ya almacenado en estos vectores, se pueden construir matrices con la información XY y XZ del objeto y graficarlos, esto es necesario para el siguiente paso del algoritmo.

3.3 Movimiento y trayectoria del robot manipulador:

a) Posición X y Y finales de la trayectoria del Robot:

Para relacionar la posición del objeto sentido con el entorno de trabajo real se llevó a cabo el siguiente desarrollo:

Utilizando la imagen ImageTop, que es la figura que indica la posición X y Y del objeto, se detectaron dichos valores en pixeles de la imagen.

Se ubicó un origen de la imagen virtual en el medio de esta, es decir, si se encuentra que la posición X y Y de la figura es 213 para ambos, el elemento se encontrará en el origen o centro del espacio de trabajo del robot. En el caso que el objeto se encuentre fuera del origen, se calcula la distancia en pixeles tanto para el eje X como para el eje Y, y estos valores se escalizan a distancias reales del suelo de trabajo del robot. Esta escala se llevó a cabo mediante una regla de 3 simple, así:

$$\text{Distancia real } X = (\text{distancia en pixeles } X * 447.234 \text{ mm}) / (426 \text{ pixeles en } X)$$

$$\text{Distancia real } Y = (\text{distancia en pixeles } Y * 353.056 \text{ mm}) / (426 \text{ pixeles en } Y)$$

Teniendo los valores reales a los cuales el objeto está corrido del centro, se procede a aumentarlos o disminuirlos a la posición central del *gripper*, definida como: centro del *gripper* en X: 390.52., centro del *gripper* en Y: -14.83.

Finalmente, al valor real encontrado en X se le debe sumar la distancia real entre el foco del lente y el centro del *gripper* que es aproximadamente 108.19 mm.

b) Planeador de trayectorias:

Teniendo los puntos X y Y finales adonde el robot debe llegar, y también los puntos X y Y iniciales que son aquellos donde se detectó el objeto, se procede a construir el planeador de trayectorias del manipulador.

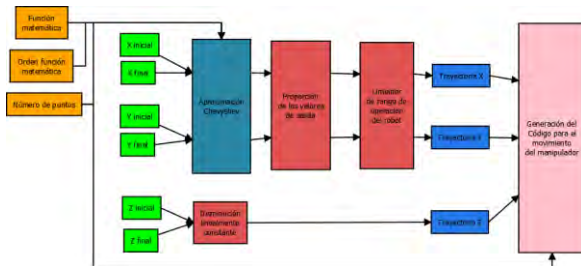


Figura 5. Estructura del planeador de trayectorias.

Como se mencionó en el inicio del trabajo de grado, para optimizar la trayectoria del manipulador se utilizó la técnica de aproximación Chebyshev. Los valores necesarios para el buen funcionamiento de esta técnica son:

- Función matemática: para fines de simplicidad se tomará la función: $f(x)=\sin(x)$.
- Orden de la función: puede tomar cualquier valor, pero hay que tener en cuenta que entre mayor sea el orden, la posibilidad de que los valores de la trayectoria se salgan del rango de movilidad del robot, aumenta.
- Número de puntos: con este valor se puede demostrar la optimización de la trayectoria, a mayor cantidad de puntos la trayectoria a planear es más cercana a la función, pero aumenta en líneas de código del robot; y a menor cantidad de puntos, la cantidad de líneas se reduce, pero la trayectoria deja de ser fiel a la función establecida.
- Puntos iniciales X, Y .
- Puntos finales X, Y .

Los valores después de pasar por la técnica de optimización se deben proporcionar debido a que estos valores tienden a estar entre -1 y 1 que es el rango de una función sinodal. Estos valores se escalan a valores de posiciones reales del robot.

Justo después de este proceso, es importante limitar estos valores con los rangos posibles de movilidad del manipulador; esto significa que si alguno de los valores de la trayectoria construida ya sea en X o en Y se salen del rango de movilidad del robot, el programa no permite la construcción de dicho código, a causa de que esto podría ser peligroso y el robot podría estrellarse o colisionar con elementos reales de su entorno. Teniendo estos valores dentro del rango definido, las trayectorias X y Y del manipulador quedan construidas y guardadas en vectores independientes.

Para el caso de la trayectoria en el eje Z , se definió un punto muy cercano al objeto y teniendo el punto inicial se llevó a cabo una disminución constante del punto inicial al punto final. Esto se logró utilizando el número de puntos definido, ya que los 3 vectores finales X, Y y Z deben tener las mismas dimensiones.

Para programar la trayectoria del robot, inicialmente se utilizó el mismo método usado anteriormente para la obtención de datos del formato STL; se programó el robot Mitsubishi mediante su controlador (*Teach Pendant*) una trayectoria sencilla de puntos definidos, y se buscó algún patrón que hiciera referencia a las coordenadas X, Y, Z del entorno real, encontrando así:

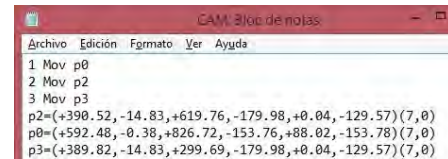


Figura 6. Estructura del planeador de trayectorias

Se observó que el código del robot presentaba una estructura clara y asequible, de fácil manipulación: Inicialmente se guardan los comandos del robot, para este caso, movimiento de p_0 (definido como la posición home o inicial del robot), luego p_2 (definido como la posición central del gripper en dirección al suelo del espacio de trabajo) y finalmente p_3 (punto de manipulación para acercarse al objeto); y después se definen los puntos con sus respectivas coordenadas X, Y y Z , que son los valores que se modificarán en el programa.

Los últimos 3 valores corresponden a la orientación de la pinza que ha sido definida siempre perpendicular al suelo del espacio de trabajo.

Ahora para la construcción del nuevo código con las trayectorias guardadas en los vectores X, Y y Z , primero se programó una estructura de ciclo *for* que recorriera dichos arreglos desde 1 hasta el número de puntos definidos inicialmente. Esto para escribir la sección de comandos del robot y la sección de puntos del robot.

4. RESULTADOS

4.1 Resultados de la obtención y manipulación de los datos de visión.

Para poder hacer la comparación entre el modelo entregado por Skanect y los vectores obtenidos, primero se visualizó este modelo en Labview, dando como resultado.

Luego teniendo los vectores X, Y y Z , se graficaron de forma tridimensional dando como resultado una nube de puntos:

Teniendo el modelo ya almacenado en estos vectores, se pueden construir matrices con la información XY y XZ del objeto y graficarlos, esto es necesario para el siguiente paso del algoritmo.

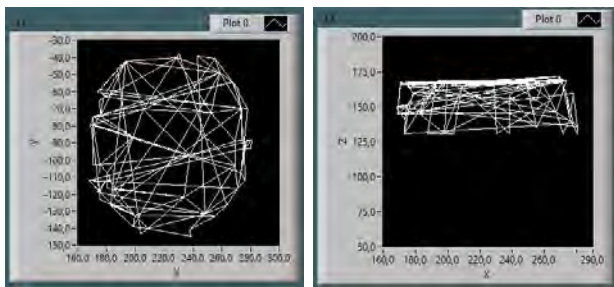


Figura 7. Modelo representado en vectores XYZ.

Estos planos son los necesarios para poder llevar a cabo el respectivo tratamiento de imágenes, ya que se puede intuir de qué figura geométrica se trata.

4.2 Tratamiento de Imágenes.

Después de convertir los planos anteriormente mostrados a imágenes, se visualizaron, al igual que después de aplicarles la operación morfológica Erode, dando la siguiente comparación:

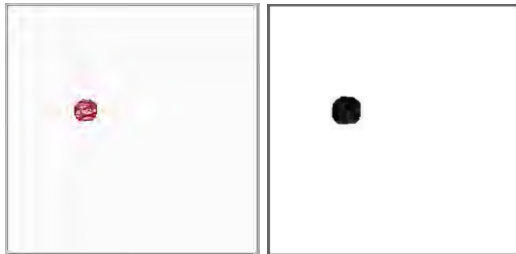


Figura 8. Modelo representado en vectores XYZ.

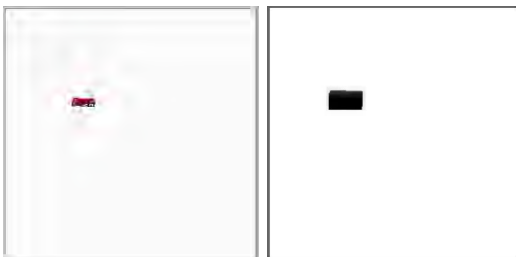


Figura 9. Modelo representado en vectores XYZ.

Analizando estos resultados, se puede decir que con el tratamiento de imágenes aplicado, es suficiente para poder detectar a qué tipo de figura geométrica pertenece el objeto sensado.

Con esta información definida, y al aplicar el árbol de decisión diseñado, se pueden detectar que figura geométrica es el objeto y que características posee este, esto con el fin de lograr una reconstrucción del entorno 3D con valores reales de sus dimensiones.



Figura 10. Entorno 3D reconstruido. Características del cilindro.

Para poder lograr una comparación del objeto reconstruido tridimensionalmente con el objeto real se presenta la tabla 1.

Tabla 1. Comparación mediciones.

Dimensión	Real (mm)	Virtual (mm)	Error (%)
Altura cilindro	40	42.0195	5.04875%
Diámetro cilindro	25	27.49	9.96%

El error porcentual se encuentra por debajo del 10%, lo que nos indica que la reconstrucción es fiel al objeto real, teniendo en cuenta que son dimensiones muy pequeñas.

5. RESULTADOS PLANEADOR DE TRAYECTORIA

Para comprobar la optimización de la trayectoria planeada, se mostrarán los resultados de dos casos; el primero para una trayectoria de 5 puntos y el segundo para una trayectoria de 100 puntos; de esta forma, se podrán hacer los análisis respectivos. Para ambos casos se definió una función matemática $f(x) = \sin(x)$, de orden 5, y con los mismos puntos iniciales y finales, así:

Caso 1: número de puntos = 5. Para este caso la trayectoria en X y en Y que presentó el planeador corresponde a las siguientes gráficas respectivamente:

Puede analizarse que con 5 puntos, el recorrido no muestra un comportamiento senoidal, que es lo esperado, más bien tiende a ser muy lineal y brusco en sus cambios de dirección. Por otro lado, el código generado del robot posee alrededor de 10 líneas, lo que hace que el robot llegue al punto final más rápido debido a que tiene que cumplir menos instrucciones.

Función	Unidad
X Inicial	X Final
448	520
Y Inicial	Y Final
-20	-147.53
Z Inicial	Z Final
419.76	419.76

(a) Características del planeador de trayectorias.

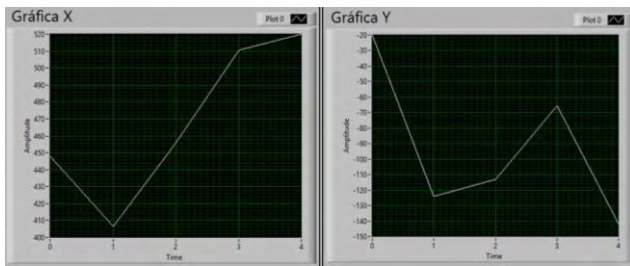
(b) Trayectoria X y Y , para 5 puntos.

Figura 11. Planificación de trayectorias.

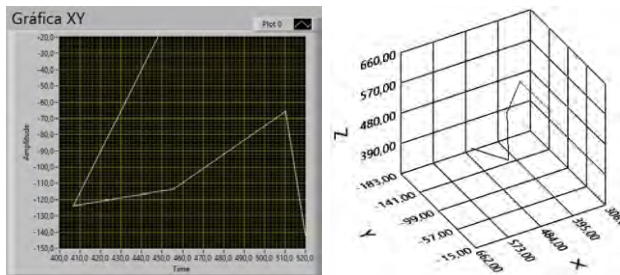
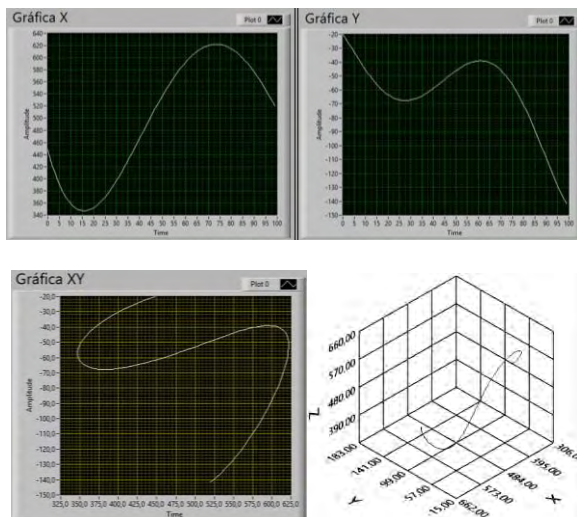


Figura 12. Gráfica XY - Trayectoria vista desde el Plano XY, en el espacio (5 puntos).

Caso 2: número de puntos = 100. De igual forma que en la caso 1, las gráficas que a continuación se muestran hacen referencia a las trayectorias X y Y respectivamente.

Figura 13. Trayectoria X y Y para 100 puntos.

Finalmente, se puede ver cómo a mayor cantidad de puntos, la trayectoria tiene a comportarse a la función matemática especificada, y tiende a ser mucho más suave o fluida. Aunque al mismo tiempo el código generado para mover el robot tiene alrededor de 200 líneas en total, tanto de comandos como de posicionamiento; haciendo que el robot tenga un movimiento más fluido pero mucho más lento a causa de la gran cantidad de instrucciones a cumplir.

Como análisis final, al ser el trabajo de grado la integración de dos dispositivos novedosos y que no se han trabajado a profundidad, abre la posibilidad a futuros autores de seguir con la investigación y mejorarla o como idea o estado del arte para nuevos desarrollos.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Después de hacer un respectivo análisis de las posibles soluciones al problema planteado y considerando todos los dispositivos de visión útiles para la aplicación deseada, se concluyó mediante una matriz de decisión, la solución mas viable y adecuado para el desarrollo del trabajo de grado.

La reconstrucción virtual en 3D de los objetos reales, posee una innumerable cantidad de aplicaciones, en muchos campos del conocimiento.

Un dispositivo de bajo costo, fácil manejo y fácil alimentación, como lo es el Sensor *Prime Sense Carmine 1.09*, es una gran opción para reemplazar el uso del Kinect, que aunque posee librerías para usarlo, presenta desventajas respecto al primero.

El programa SKANECT facilitó de gran manera el sensado del entorno real, además su software de demostración es gratuito, de muy fácil manejo y con muchas opciones de manipulación de datos que para otras aplicaciones o desarrollos, tendrían gran validez.

Mediante el correcto tratamiento de imágenes se logró determinar características físicas de objetos reales como diámetros de cilindros, diámetros de esferas, altura de cilindros y lados de cubos.

Los distintos módulos o complementos de LABVIEW, ayudan de inmensa forma a la solución de problemas y desarrollo de aplicaciones; para este caso el módulo de tratamiento de imágenes evitó grandes procesos de programación que tienden a reducir el tiempo de ejecución de programas y aumentar la probabilidad de errores.

Se decidió utilizar el robot Mitsubishi RV-6SQL ya que es el manipulador presente en el laboratorio de automatización de la Universidad Militar Nueva Granada, esto facilitó tanto la manipulación de este como la integración de dispositivos externos, algo que no se podría haber logrado con manipuladores no académicos.

Utilizando la teoría de aproximación Chevyshev como técnica de optimización, se logró construir un planeador de trayectorias para el robot Mitsubishi RV-6SQL. Este planeador posee distintos parámetros, esto con el fin de que el usuario los ajuste dependiendo de la trayectoria que este desee que realice el robot.

Para que todos los puntos de la trayectoria del manipulador fueran posibles, fue necesario conocer el alcance máximo de este en sus 3 ejes, de este modo si algún punto de la trayectoria se encontrara fuera de este espacio de trabajo, no era posible generar el código de movimiento del robot.

La cinemática inversa del robot Mitsubishi fue de gran ayuda para la construcción del planeador de trayectorias y lograr el movimiento del robot manipulador Mitsubishi.

El objetivo de este proyecto de investigación es desarrollar una estrategia de búsqueda de puntos óptimos de agarre para un manipulador con un efector final de tres dedos, capaz de obtener una solución en un tiempo coherente con su aplicación.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Pablo Muñoz Rodríguez, *Desarrollo de aplicaciones integrando robótica y visión en un robot industrial KUKA para demostrar sus capacidades*. Proyecto de final de carrera, Universidad Politécnica de Valencia, Septiembre del 2011.
- [2]. Jaime Masia, Juan Ramon Rufino, Javi Tormo, Jose Ferri, Borja Mansilla *Diseño de un ambiente virtual mediante visión artificial para aplicaciones en telerobótica*. XXXII Jornadas de Automática Sevilla, 2011.
- [3]. César Eduardo Jiménez Robayo, *Diseño y construcción de un robot manipulador tipo SCARA con sistema de visión de máquina, que pueda ser utilizado como herramienta didáctica en asignaturas de robótica y control*. Trabajo de grado, Universidad Militar Nueva Granada, 2009.
- [4]. J. A. Soto Cajiga, J. E. Vargas, J. C. Pedraza *Generación de trayectorias para un robot manipulador utilizando procesamiento de imágenes*. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/237122434_Generacin_de_trayectorias_para_un_robot_manipulador_utilizando_procesamiento_de_imgenes_y_splines_Trajectory_generation_for_a_manipulator_robot_using_image_processing_and_splines
- [5]. Cosmin Grigorescu, Nicolai Petkov, Distance sets for shape filters and shape recognition. *Ieee transactions on image processing*, vol. 12, no. 10, october 2003. Octubre 2003.
- [6]. Ery Arias-castro, David L. Donoho, Xiaoming Huo, Senior. *Near-optimal detection of geometric objects by fast multiscale methods*. IEEE Trans. Inform. Theory. Julio 2005.
- [7]. Yin Li, Heung-Yeung Shum, Chi-Keung Tang, Richard Szeliski, *Stereo Reconstruction from Multiperspective Panoramas*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 26, no. 1, January 2004.
- [8]. Chichyang Chen and Yuan F. Zheng, Passive and active stereo vision for smooth surface detection of deformed plates. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Vol 42. No 3. June 1995
- [9]. Ira Kemelmacher-Shlizerman, Ronen Basri, 3D Face Reconstruction from a Single Image using a Single Reference Face Shape. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 2010.
- [10]. John R. Jordan III and Alan C. Bovik. Computational Stereo Vision using Color. *IEEE Control Systems Magazine*. June 1988.
- [11]. Remo Ziegler, Wojciech Matusik, Hanspeter Pfister and Leonard McMillan. *3D Reconstruction Using Labeled Image Regions*. Eurographics Symposium on Geometry Processing (2003), pp. 1–12.
- [12]. Marc Pollefe, *Self-Calibration And Metric 3d Reconstruction From Uncalibrated Image Sequences*. PhD Thesis. Katholieke Universiteit Leuven. Faculteit Toegepaste Wetenschappen. Departement Esat. 1999.
- [13]. Reinhard Koch and Jan-Michael Frahm. *Visual-Geometric 3-D Scene Reconstruction From Uncalibrated Image Sequences*. Multimedia Information Processing Group Christian-Albrechts-University of Kiel, Germany. 2001. Disponible en: <http://www.isprs.org/education/pdf/DAGM-Tutorial-Color.pdf>
- [14]. Moreno Trejo Roberto, Cabrera Ríos Juan Salvador, Hernández Ramírez Fernando, José Emilio Vargas Soto y Jesús Carlos Pedraza Ortega, *Software De Simulación De Un Robot Manipulador Marca Mitsubishi RV-2AJ*. 4TO Congreso Nacional de Mecatrónica. 3-5 de noviembre, 2005. Coahuila, México.
- [15]. Coman, M, Cluj-Napoca, Stan, S, Manic, Balan, R. *Application of Distance Measuring with Matlab/Simulink*. Human System Interactions (HSI), 2010 3rd Conference on, 13-15 May 2010
- [16]. D. H. Ballard, *Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes*. Pattern Recognition. Vol 13. No 2. pp 111-122. 1981.
- [17]. Ladikos, A; Benhimane, Selim; Navab, N., *Efficient visual hull computation for real-time 3D reconstruction using CUDA*, Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2008. CVPRW '08. IEEE Computer Society Conference on, vol., no., pp.1,8, 23-28 June 2008
- [18]. Miguel Angel Garcia and Agusti Solanas, *3D Simultaneous Localization and Modeling from Stereo Vision*. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation. 2004.
- [19]. Luis Gerardo de la Fraga. *Reconstrucción Tridimensional A Partir De Varias Imágenes*. Sección de Computación Departamento de Ingeniería Eléctrica CINVESTAV. Noviembre, 2005. Disponible en: <http://delta.cs.cinvestav.mx/~fraga/Charlas/rec3d.pdf>

- [20]. Johan Alberto Arzuza Narváez. *Herramienta Software para Reconstrucción Digital 3D y Visualización de Superficies*. Ventana Informática No. 12 – Universidad de Manizales, enero – junio / 2005 – pp 79-96
- [21]. Federico Cristina, Sebastián H. Dapoto, Javier Vegas, Verónica Artola, Claudia Russo, María José Abásolo. *Reconstrucción 3d: De La Adquisición A La Visualización*. Instituto de Investigación en Informática LIDI Facultad de Informática. Universidad Nacional de La Plata, disponible en: <http://catalogo.info.unlp.edu.ar/meran/getDocument.pl?id=559>

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT GUSANO TIPO EXPLORADOR

Designing and building of an explorer worm type bot

RESUMEN

En el presente artículo se describe una propuesta de diseño de un robot explorador tipo ápodo con su respectivo análisis enfatizado en el desplazamiento y esfuerzos que surgen en éste. El movimiento zigzagueante, característica de este tipo de robot, al proporcionar un movimiento rectilíneo que se puede adaptar fácilmente a los cambios de altura como de terreno, como los escombros y las tuberías por lo que se usa para la búsqueda de minerales y poder encontrar el área navegable de la zona.

Palabras clave: ápodo, arduino, nano, movimiento zigzagueante, robot explorador, servomotor.

ABSTRACT

In the present article you're going to see a proposal of design of an explorer robot "legless" type, with its respective review, emphasized in the effort and displacements which come out in this one. The rectilinear movement that can easily adapt to the height changes as well as terrain, like rubbles and pipes, for which is used to the reaching of minerals and to find out the navigable area of the zone

Keywords: Arduino nano, Explorer robot, legless, servomotor, Zigzag movement,

JONATHAN BERMÚDEZ

Estudiante de Ingeniería
Mecatrónica
Universidad Piloto de Colombia
Jbermudez42@upc.edu.co

TATIANA MARTÍNEZ

Estudiante de Ingeniería
Mecatrónica
Universidad Piloto de Colombia
Cmartinez99@upc.edu.co

RUBÉN HERNÁNDEZ

Ingeniero mecatrónico, M.Sc.
Estudiante de doctorado
Profesor de ingeniería mecatrónica
Universidad Piloto de Colombia
Oscar-aviles@upc.edu.co

ÓSCAR FERNANDO AVILÉS

Ingeniero electrónico, Ph.D
Profesor de Ingeniería Mecatrónica
Universidad Piloto de Colombia
Oscar-aviles@upc.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Los robots exploradores del tipo ápodo son una clase poco explorada en comparación con otras clases de robots exploradores como son el tipo oruga o el tipo zoomórfico. Esta clase de robot surge de la necesidad de explorar lugares estrechos como túneles y grietas en las cuales las otras clases de robots exploradores no son tan eficaces, debido a que el tamaño de estos robots es muy grande y no pueden ser utilizados para estos usos. Frente a esta problemática, los robots ápodos fueron una solución debido a que está compuesto por celdas unitarias con las que este robot puede adaptarse a los distintos cambios que surgen en los terrenos a explorar.

Se buscó plantear un robot ápodo con el cual se pueda analizar el movimiento zigzagueante o sinusoidal que caracteriza principalmente a esta clase de robot. Este movimiento se realiza en dos dimensiones con la que se distribuyen los puntos de apoyo en el tiempo formando una onda sinusoidal y generar un punto de control a través de un sensor de posición, el cual nos ayuda a que con la detección de algún tipo de objeto, el robot se detenga para evitar algún tipo de choque. Además, emite una señal de aviso para saber cuándo el robot se detiene o cuando está explorando.

Los robots gusano, o tipo de ápodo, se caracterizan principalmente por su facilidad a la hora de ejecutar su movimiento, sin embargo su desplazamiento proporciona algunas dificultades debido a las restricciones propias del modelo o diseño cinemático (material) y, además, al esfuerzo de cada uno de los motores a la hora de la locomoción del robot. Para evitar esto se decidió modificar la forma de la celda unitaria, la cual permite mejorar el punto de apoyo aumentando la fricción entre el terreno y el robot, proporcionando así un desplazamiento adecuado. También se escogió aumentar el número de motores para posicionar un motor en cada punto de apoyo para distribuir mejor la fuerza de cada motor y eliminar la necesidad de motores con mayor fuerza, con estos ajustes se mejora el diseño y el análisis del movimiento del ápodo.

El diseño del robot gusano desarrollado se basó principalmente en una pieza unitaria similar a las encontradas en [3] y en [5], la cual permite mayor desplazamiento y locomoción gracias a los puntos de apoyo que presenta. Además, se incorporó una forma semitriangular para aumentar la fricción y desplazamiento del robot. También, el robot gusano se diseñó de esta forma con el objetivo de cumplir distintas funciones como explorar grietas pequeñas o usarlo en la

industria minera y de gases al igual que los robots presentados en [2], [3] y en [5].

Todo esto se realizó con el fin de poder diseñar y analizar esta clase de robot, el cual está enfocado a la exploración y el análisis de terrenos a través de sensores indicando al usuario en tiempo real el estado del terreno, para asegurar el recorrido o posición de un elemento con propiedades que el usuario requiera.

Este artículo después de la introducción está dividido de la siguiente manera: la sección 2 explica el diseño y los distintos factores que se analizaron para evaluar las cualidades de este, en la sección 3 explicamos las condiciones que se debieron tener en cuenta para realizar la programación y el objetivo de este sistema. Luego encontramos la sección 4 en la que se realizó el análisis de resultados para llegar así a la sección 5 que corresponde a las conclusiones que se pudieron obtener con el resultado y análisis realizados y finalizamos con la sección 6 de la bibliografía.

2. ESTRUCTURA MECÁNICA

El diseño del robot fue realizado para proporcionar un movimiento zigzagueante a través de los cambios de posición de un servomotor. Para poder ocasionar su desplazamiento se tuvo en cuenta la fricción en los puntos de apoyo principales del robot al momento de impulsarse.

2.1. Rodamiento

Un rodamiento es una pieza mecánica diseñada para disminuir la fricción, está compuesto por dos placas que encierran unos cuerpos rodantes como bolas o rodillos los cuales permiten un desplazamiento independiente entre las placas.

2.2. Cabeza

Esta pieza fue diseñada para mantenerse unida al suelo por lo que posee aristas rectas, posee dos agujeros a cada lado, uno se incrusta en un lado el tornillo y el otro en un rodamiento, al ser una pieza unitaria se requieren estos agujeros.

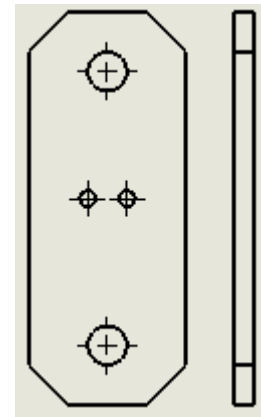


Imagen 2. Pieza de unión de la cabeza

2.3. Cuerpo

Esta pieza está basada en la misma de la cabeza, pero con una modificación de inclinación de la arista para lograr una figura semitriangular, con la que se proporciona mayor desplazamiento y flexión sobre la superficie.

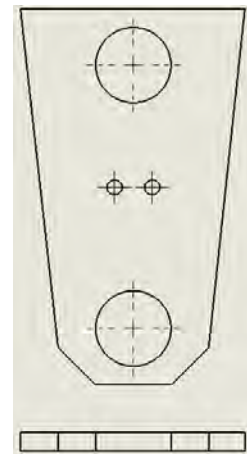


Imagen 3. Pieza unitaria del cuerpo

2.4. Ensamble

Se realizó un ensamble de forma directa entre las piezas y los motores usando en ciertos puntos los rodamientos como punto de apoyo para esto, dando como resultado el ensamble mostrado en la imagen 4.

Este diseño físico del robot proporciona un movimiento zigzagueante a través de los cambios de posición de un servomotor, para poder ocasionar su desplazamiento se tuvo en cuenta la fricción en los puntos de apoyo principales del robot al momento de impulsarse.

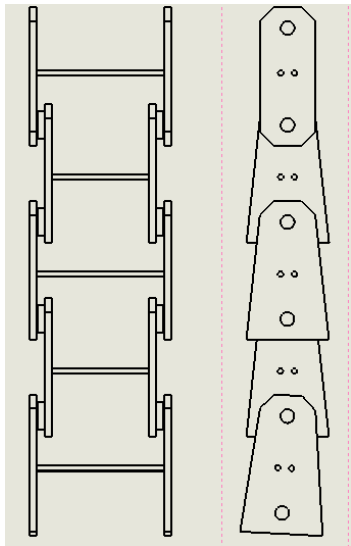


Imagen 4. Posición de las piezas para ensamble.

2.5. Análisis de movimiento

Para analizar el movimiento del robot debemos tener en cuenta los puntos de apoyo de los motores debido a que en estos puntos se genera mayor presión al estar conectados directamente a las piezas, esto genera la onda sinusoidal de distribución de la fuerza de apoyo, la cual genera el mayor punto de esfuerzo a alcanzar los 90° y a iniciar el movimiento en 0° .

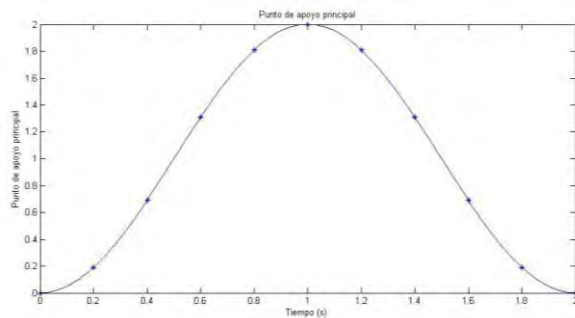


Imagen 5. Puntos de esfuerzo en el desplazamiento

Según la imagen 5, vemos el punto principal de apoyo de la celda unitaria del gusano donde se centra la mayor presión en la estructura a medida que se desplaza, al ser un movimiento uniforme encontramos que el desplazamiento puede ser descrito la mitad del periodo es decir $T/2$ que es equivalente a dos veces la longitud entre cada motor equivalente a $2L$, por lo tanto la velocidad de desplazamiento es $v = \frac{2L}{T/2} = \frac{4L}{T}$ en la cual se puede deducir la ecuación de desplazamiento:

$$d = \frac{4L}{T} * t$$

Ecuación 1. Ecuación de desplazamiento

Con base a la ecuación encontrada anteriormente se realizó la siguiente gráfica en la cual vemos cómo es la relación de tiempo y distancia sin tener en cuenta terrenos específicos que atrasaran el desplazamiento. En

este encontramos que la relación de movimiento es estrechamente relacionada con los puntos de apoyo del motor y la distancia entre las aristas, cosa que debe tener en cuenta.

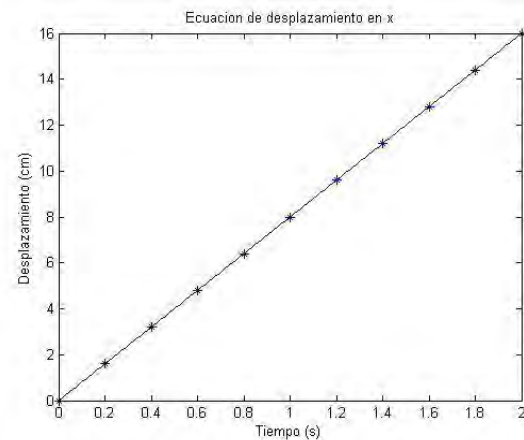


Imagen 6. Desplazamiento con base al tiempo.

2.6. Análisis de esfuerzos

En la pieza anterior podemos observar que ésta es sometida a fuerzas tanto externas como internas, las cuales producen un esfuerzo de la pieza a la hora de ejercer movimiento. Gracias a esto, la pieza sufre una deformación leve debido al diseño y fuerza ejercida por los motores al no tener amortiguadores.

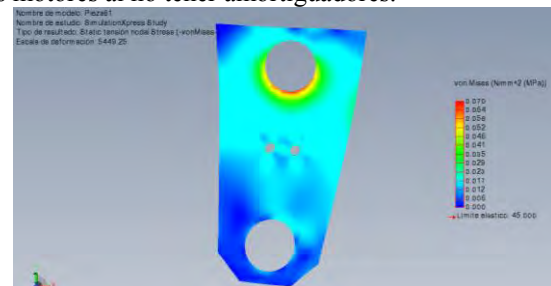


Imagen 7. Análisis de esfuerzos.

En esta imagen vemos cómo la pieza sufre una deformación con base a un punto principal de apoyo, el cual sufre mayor esfuerzo (color rojo). Con base a este punto principal de apoyo se creó una deformación.

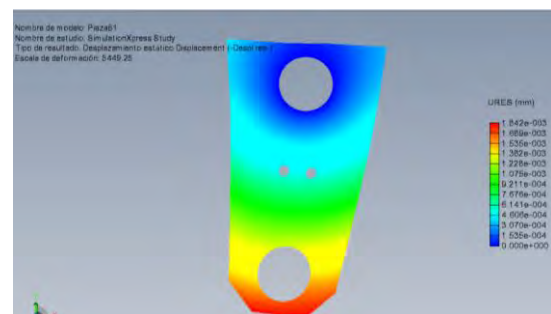


Imagen 8. Análisis de desplazamiento estático

En la imagen anterior observamos el nivel de desplazamiento de la figura con base al punto principal de apoyo, en este caso es el que está en color azul oscuro. Además, el punto de color rojo es un caso de mayor deformación y esfuerzo en un caso extremo, ya que este punto está unido a otra pieza unitaria, la cual funciona como un amortiguador mecánico, ocasionando que en otro caso en que se esfuerce mucho el robot, llegue a esta deformación.

3. CONTROL

Al analizar el funcionamiento mecánico nos dimos cuenta que se requiere precisión en los ángulos que se formaban entre los componentes para poder obtener el mejor rendimiento del robot, por lo que se escogió utilizar en la estructuras servomotores que aseguran esto gracias al pulso de PWM que se emplea en éste, también porque este motor proporciona una fuerza de torque considerable para mover una sección del robot y mantener esa posición.

Para poder realizar el pulso de PWM para los servomotores se escogió una tarjeta arduino nano la cual se enlazó a un módulo *bluetooth* y a un sensor de posición para así tener dos puntos de control para este.

Con base a esos dos puntos de control se realizó un programa que permite realizar el movimiento del gusano mientras no haya obstáculos a cierta distancia y el usuario permita que este se mueva y pueda monitorear la distancia de los obstáculos más cercanos.

4. RESULTADOS

Logramos analizar el movimiento rectilíneo del robot a través de la simulación mostrada en la imagen 9, en la cual logramos ver que se planteó uniendo dos celdas unitarias las cuales ocasionaron que se doblara el desplazamiento mostrado pero manteniendo el cambio del punto de esfuerzos en cada celda que conforma la onda sinusoidal. Con este cambio se tuvo en cuenta que al manejar varios motores aumenta la necesidad de mayor amperaje mientras que se maneja el mismo para el controlador, el cual mantiene una fuente distinta de energía.

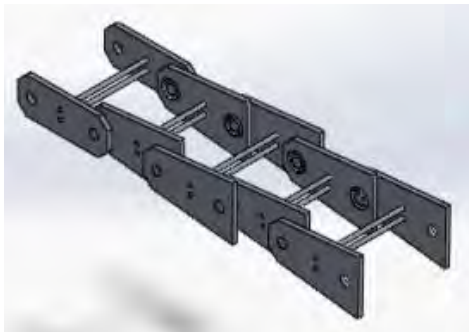


Imagen 9. Simulación del gusano.

Después del análisis a través de la simulación seguimos a analizar el modelo físico de este mostrado en la imagen 10, al observar este encontramos que al no ser un movimiento gradual, este generaba un golpe al cambiar de posición el cual se logra evaluar en el análisis de esfuerzos en el que se tomaron en cuenta las circunstancias en que se generaría mayor fuerza, en esta se generaría una deformación la cual no es muy significativa antes de regresar a su forma original, también logramos ver que en ciertas superficies no se generaba fricción entre los puntos de contacto entre el robot y el suelo por lo que se debió unir un tercer elemento entre estos, unido al punto de contacto del robot para generar la fricción adecuada para el impulso de este.



Imagen 10. Robot gusano.

5. CONCLUSIONES

Debido a que esta clase de robot no ha sido explorado, se analizó el movimiento de éste para poder ver sus cualidades, se limitó en un movimiento en dos dimensiones (2D) para facilitar su análisis y ver su comportamiento en el plano XY que son los principales, ya que este mismo se puede replicar en el plano X,Z el cual complementa el movimiento y genera el desplazamiento en tres dimensiones (3D) por lo que éste no es necesario, encontramos que cambia el punto de masa como el punto de presión a medida que este se desplaza formando así una onda sinusoidal a medida que cambia el ángulo del punto de apoyo por lo que se puede decir que mantienen una relación directa y que los puntos de mayor observación son los ángulos de 0° y 90° al ser en los que inicia el movimiento y el que se mantiene antes de terminar el ciclo para que inicie de nuevo.

Se debieron tener en cuenta circunstancias externas como los obstáculos, el material del terreno y la cantidad de objetos que se encuentran porque debido al desplazamiento del robot y a la estructura del programa, este se detiene en la misma posición que tiene cuando está en reposo por lo que es necesario detener al robot a cierta distancia del obstáculo contemplando la distancia que este recorre suponiendo que se encuentra en su punto máximo que sería el escenario que propone mayor dificultad.

El robot, al ser casi un autómatas, sigue su movimiento aun cuando este pierda la señal del usuario pero sí se detiene cuando este lo requiere por lo que el papel del

usuario es recibir los datos para conocer si hay un camino despejado y detenerlo si es requerido mientras se mantenga la señal, por eso hay que tener en cuenta los posibles factores que debiliten la señal a requerir una señal constante el usuario, mas no es necesario para el robot.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1]González Juan. 2008. *Cube Revolutions*,
http://www.iearobotics.com/wiki/index.php?title=Cube_Revolutions.
- [2](2012, Aug). Robot Gusano Meshworn.
http://www.ecured.cu/index.php/Robot_Gusano_Meshworn.
- [3] Granosik Grzegorz; Hansen Malik G; Borenstein Johann.2005. The OmniTread serpentine robot for industrial inspection and surveillance.
<http://search.proquest.com.ezproxy.unipiloto.edu.co/pqrl/docview/217013852/14021A274797CD3F9CB/12?accountid=50440#center>.
- [4] Vergun, David.(2003, Jun). The slithering robot tries to worm its way into Navy's tactical units.
<http://search.proquest.com.ezproxy.unipiloto.edu.co/pqrl/docview/235976991/14021A274797CD3F9CB/1?accountid=50440#center>.
- [5] Anonymous.(1999, Apr). Biomorphic, robotic worm explorers tunnel.
<http://search.proquest.com.ezproxy.unipiloto.edu.co/textgraphic/208826979/TextPlusGraphics/3?accountid=50440>.

SISTEMA ROBÓTICO PARA REHABILITACIÓN DE MARCHA ENFOCADO A NIÑOS CON PARÁLISIS CEREBRAL

Robotic system for gait training focused on children with cerebral palsy

RESUMEN

Este artículo presenta una vista general del proceso de diseño de un sistema rehabilitador de marcha orientado a niños con parálisis cerebral, como una alternativa a los sistemas existentes en el mercado. A pesar de que dichos sistemas cubren la función de guiar las extremidades inferiores de los pacientes durante las terapias de marcha, aún hay factores críticos que los diseñadores no han abarcado y que son relevantes para mejorar la calidad de vida de los niños con esta condición. Aquí se presenta la metodología utilizada durante el desarrollo del proceso de diseño; además, se hace una breve revisión de algunos dispositivos, el análisis de requerimientos para el sistema y un acercamiento al modelo cinemático de las extremidades inferiores utilizado en el proceso de establecer el mecanismo motor del sistema.

Palabras clave: diseño, parálisis cerebral, rehabilitación de marcha, sistema robótico.

ABSTRACT

This paper provides an overview of the design process for a gait training system oriented to children with cerebral palsy, as an alternative for the existing systems. Although these devices accomplish the guidance of lower limbs of patients during gait training therapies, there are still critical factors that designers have not covered, which are relevant to the intention of improving the quality of life of children with this condition. Here, the methodology used during the development of the design process is presented. Furthermore, a brief review for some devices, an analysis of requirements of the system, and the approach for the kinematic model of lower limbs used in the process of establishing a motor mechanism for the system are presented.

Keywords: cerebral palsy, design, gait training, robotic system.

MARCO TULIO FIGUEROA AMADOR

Ingeniero en Robótica Industrial
Alumno Posgrado
Instituto Politécnico Nacional,
Escuela Superior de Ingeniería
Mecánica y Eléctrica, Unidad
Azcapotzalco
fiam_88@hotmail.com

PAOLA ANDREA NIÑO SUÁREZ

Ingeniera en Electrónica, M.Sc.
Ph.D.
Profesora titular
Instituto Politécnico Nacional,
Escuela Superior de Ingeniería
Mecánica y Eléctrica, Unidad
Azcapotzalco
paola.niño.suarez@gmail.com

ÉDGAR ALFREDO PORTILLA FLORES

Ingeniero en Comunicaciones y
Electrónica, M.Sc. Ph.D.
Profesor titular
Instituto Politécnico Nacional,
Centro de Innovación y Desarrollo
Tecnológico en Cómputo
edport22@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

La parálisis cerebral (PC) es un trastorno postural y motriz provocado por una agresión no progresiva a un cerebro inmaduro y es la causa más frecuente de discapacidad motora pediátrica; los tipos más comunes de PC son la diparesia espástica y la hemiparesia espástica. De acuerdo con la gravedad de la afectación, el individuo tendrá limitaciones funcionales en el sistema locomotor, que van desde alteraciones en la postura, debilidad o aumento del tono muscular, espasmos musculares, disminución sensorial y de reflejos, malformaciones ortopédicas, pérdida de control de las extremidades y falta de coordinación motriz, por mencionar algunas. Dentro del tratamiento integral para este trastorno, las terapias funcionales y de rehabilitación motriz adquieren gran relevancia para mejorar la calidad de vida en pacientes clasificados dentro de los niveles I,

II y III de la escala GMFCS, para los cuales existe un pronóstico de deambulación favorable [1].

La prevalencia de PC en los países occidentales es de 1,5 a 2,5 por cada 1000 nacidos vivos [2]. Pese a que durante la década de los 1990 se presentó una tendencia al descenso [3], en años recientes el aumento en la sobrevivencia de infantes prematuros que desarrollan PC con afectaciones funcionales de moderadas a severas ha provocado un cambio al alza de dicha tendencia [4]. En México se estima que existen no menos de 500 000 casos de PC y, de acuerdo con datos de la Oficina de Representación para la Promoción e Integración Social de las Personas con Discapacidad, de la Presidencia de la República, cada año se suman a esa cifra 12 000 personas con este padecimiento, de las cuales el 75% requiere, a través de un entrenamiento guiado, formar los patrones de movimiento neuromuscular para la marcha funcional.

En las últimas décadas, la utilización de dispositivos robóticos basados en soporte del peso corporal (BWS por sus siglas en inglés) en la rehabilitación activa de la marcha para trastornos en el sistema nervioso central ha mostrado una mejora significativa respecto a las terapias funcionales convencionales. Aunque en el caso de la PC solo se puede confirmar un diagnóstico después de los 2 años de edad, el trabajo de rehabilitación de marcha en infantes puede efectuarse a partir de 1 año y medio de edad; sin embargo, son pocos los dispositivos para la rehabilitación pediátrica de la parálisis cerebral, debido a que en general son diseñados para la rehabilitación de discapacidades motoras de personas adolescentes, adultas y de tercera edad.

La intención de este artículo es presentar un acercamiento temprano al proceso de diseño para un sistema rehabilitador de marcha (RM) enfocado a niños con PC. Asimismo, el artículo quiere establecer la metodología de diseño y los requerimientos necesarios para dicho sistema.

2. METODOLOGÍA DE DISEÑO

Para el diseño del dispositivo se trabajó con una metodología estructurada basada en un modelo descriptivo como el que se muestra en la figura 1. Para complementar el planteamiento del problema después de la revisión de los sistemas para RM, se usó el despliegue de la función de calidad (QFD por sus siglas en inglés), como una herramienta para establecer de forma adecuada los requerimientos técnicos que deberá cumplir el sistema.

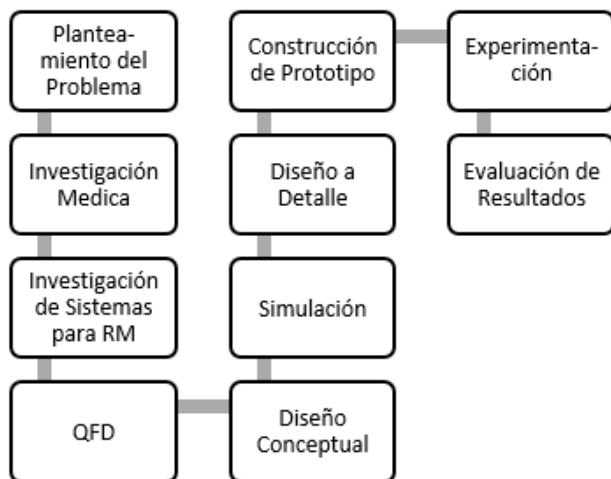


Figura 1. Modelo lineal para el proceso de diseño.

3. REVISIÓN DE LOS SISTEMAS DE RM

Existe una amplia gama de dispositivos utilizados en la rehabilitación de marcha; sin embargo, en este artículo solo se mencionan los que, se considera, cuentan con características funcionales de valor entre todos aquellos que se revisaron. Entiéndase así que la intención para la revisión de dichos sistemas responde únicamente a la exploración de soluciones tecnológicas y alternativas entre los sistemas más relevantes, como un inicio en el proceso de obtención del diseño conceptual para el sistema que se propone.

Dentro de los sistemas que más llaman la atención se encuentra el exoesqueleto para extremidades inferiores LOPES, desarrollado por la Universidad de Twente, en Holanda, como una opción para la rehabilitación de pacientes víctimas de accidente cerebrovascular (ACV) [5]. El sistema está compuesto por un brazo robótico de dos eslabones para cada pierna, que se fija a la cadera y rodilla de la extremidad inferior correspondiente, mientras el individuo, suspendido por un sistema BWS, simula la marcha normal en una banda caminadora. LOPES utiliza una serie de cables Bowden como actuadores electromecánicos y tiene un arreglo de resortes que elimina el efecto no lineal de las cargas generadas por los cables Bowden. LOPES funciona en dos modalidades: la modalidad libre, que permite el movimiento de las extremidades sin que el paciente sienta resistencia alguna del dispositivo; en la segunda modalidad, el dispositivo asume la carga y efectúa los movimientos que el paciente es incapaz de realizar por su cuenta. Los datos adquiridos a partir de los movimientos angulares en las articulaciones durante la modalidad libre son comparados con los datos de marcha de un sujeto saludable. Esta comparación sirve para efectuar el control por impedancia para compensar las diferencias angulares articulares de los miembros durante la modalidad de carga [6]. Sin embargo, el uso del dispositivo no muestra diferencias significativas en el momento de comparar, con sujetos saludables, las señales electromiográficas y los patrones de marcha [5].

En la Universidad de California, en Estados Unidos, W. E. Ichinose y su equipo de investigadores desarrollaron tres sistemas que se han utilizado para estudio y rehabilitación pasiva de la marcha. El manipulador de asistencia pélvica (PAM, por sus siglas en inglés) se compone de un BWS, una banda caminadora y un arreglo de 6 cilindros neumáticos que se fijan a un soporte instalado detrás de la columna vertebral del individuo. El PAM cuenta con 5 grados de libertad y permite los movimientos de rotación, oblicuidad, arriba-abajo, adelante-atrás e izquierda-derecha [7]. Asimismo, el PAM utiliza un control por prealimentación, que compara los movimientos del individuo con los rangos de un sujeto saludable previamente establecidos en el sistema. Para complementar el manipulador de cadera, este diseño incluye la órtesis de marcha operada neumáticamente

(POGO, por sus siglas en inglés), que, por medio de dos actuadores neumáticos, se encarga de realizar los movimientos de las extremidades inferiores colocando uno entre la pelvis y el tobillo, y el segundo entre la rodilla y el primer actuador [8]. Pese a que la reproducción y seguimiento de las trayectorias de la cadera de sujetos saludables con PAM era considerada bastante buena sin carga, nunca se logró que pudiera guiar de forma adecuada la cadera de los pacientes [8]. De ahí que el equipo de Ichinose desarrollara la herramienta robótica de asistencia ambulatoria para rehabilitación humana (ARTHuR) [9]. La herramienta ARTHuR consta de actuadores neumáticos lineales y de un servomotor ubicado en la articulación de la rodilla, además de un sistema de cilindros adaptados a un soporte sobre el BWS, que permite el movimiento del torso durante la rehabilitación. Cabe mencionar que los grupos de estudio para los cuales se diseñaron estos dispositivos son los de víctimas de accidente cerebrovascular (ACV) y pacientes con lesión espinal y de cadera. Sin embargo, debido a las características en el diseño de su *software*, ARTHuR es empleado con frecuencia en laboratorios de estudios de marcha, para determinar las fuerzas de reacción y velocidades de movimiento de los miembros inferiores, por la simplicidad de interacción y la facilidad con la que su interfaz presenta los datos.

Sin duda, el sistema desarrollado por G. Colombo, Lokomat [10], es el más completo del mercado. El sistema básico cuenta con un BWS, banda caminadora y un brazo robótico que actúa como una órtesis con 4 grados de libertad (DOF). El sistema fue desarrollado con la intención de rehabilitar a víctimas de ACV, y a personas con lesiones en la espina dorsal y de cadera. Sin embargo, gracias a su efectividad y a la variedad de módulos con los que cuenta este dispositivo (como el módulo de realidad virtual y el módulo FreeD para simulación de trayectorias sinusoidales, así como la versión pediátrica del sistema), se ha ampliado su utilización para casi cualquier afectación neuromuscular que genere disfunción en los patrones de marcha.

Hasta el momento solo se han mencionado dispositivos basados en exoesqueletos de tipo órtesis robótica. No obstante, existen dos dispositivos particulares basados en sistemas de placas para pie, desarrollados por S. Hesse. El primero de ellos es el entrenador de marcha mecanizado (MGT por sus siglas en inglés) [11], que se fundamenta en un sistema BWS y una manivela que se utiliza para actuar dos placas largas sobre las cuales se colocan los pies del sujeto; estas placas se encargan de transmitir el movimiento al paciente y el dispositivo básicamente funciona como una elíptica. El segundo es el sistema GE-O [12], que, pese a ser sucesor del sistema MGT y estar basado en el mismo principio del uso de placas como actuadores de los pies, su mecanismo motriz es mucho más complejo que el de manivela. En efecto, un cilindro efectúa el movimiento de los platos sobre el plano sagital del cuerpo mientras que un sistema de

carros realiza el desplazamiento relativo de los pies hacia adelante y hacia atrás, de forma alternante. Ambos dispositivos fueron desarrollados para tratar a víctimas de ACV y de lesiones espinales, aunque, dado que el mecanismo actuado solo tiene contacto con los pies del individuo, resulta fácilmente adaptable a cualquier paciente y permite rehabilitar la marcha en diversas condiciones.

4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE ESTOS DISPOSITIVOS PARA SU UTILIZACIÓN EN RM EN NIÑOS CON PC

Si bien Lopes y ARTHuR muestran potencial para rehabilitar niños con PC, existen diversos factores, en sus rangos de funcionamiento y características mecánicas, que impiden su aplicación directa, debido a que el grupo de sujetos para el que fueron diseñados no incluye infantes. En Lopes, la forma como se actúan las extremidades inferiores utilizando cables Bowden como actuadores de resistencia llama la atención por ser una solución innovadora para la transmisión de potencia mecánica. Por su parte, la interfaz de análisis de la marcha en ARTHuR suministra cuantiosa información en el momento de detectar anomalías y sus causas, durante el ciclo de marcha.

Los sistemas basados en exoesqueletos ofrecen soporte estructural a las extremidades inferiores, que resulta de gran ayuda para los casos de las malformaciones ortopédicas que se presentan con la PC. Es por eso que la versión pediátrica del sistema Lokomat se ha utilizado ampliamente alrededor del mundo para RM en infantes con esta condición. Asimismo, se ha realizado infinidad de estudios sobre la utilización de este sistema, para demostrar si en verdad ofrece una mejora sustancial, al evaluar la calidad de marcha en pacientes cuyo protocolo de rehabilitación incluye este sistema. Como resultado, si bien los sujetos muestran mejoras en la cadencia y longitud de zancada, no se encuentran mejoras significativas en la fuerza de las extremidades inferiores, aunque sí un aumento en la fuerza en extensión y flexión de la cadera [13]. Estos datos se pueden recoger gracias a que las herramientas de análisis de fuerza y espasticidad con las que cuenta el sistema permiten la realización de estudios específicos.

El sistema GE-O es de reciente utilización en lo que a la PC se refiere. En él, aunque por ser un sistema basado en placas de pie no aporta soporte estructural a las extremidades inferiores, la capacidad de simulación de trayectorias tipo escaladora, tanto ascendentes como descendentes, muestra una mejora significativa respecto a la fuerza desarrollada por las extremidades durante la marcha [14]. La adaptabilidad del dispositivo a sujetos con diferentes morfologías propias de las distintas edades amplía su rango de utilización respecto a los demás sistemas. Sin embargo, el GE-O no cuenta con

mecanismos o módulos actuadores para el movimiento de cadera.

Junto con Lokomat, GE-O tiene sistemas de interacción visual con el individuo, con lo cual vuelve menos tedioso el tiempo de rehabilitación. Esto resulta de gran utilidad cuando se trata a infantes, debido a que las terapias pueden llegar a ser molestas y repetitivas, y esto suele mermar el ánimo y afectar la intención de una rehabilitación integral que cuide el aspecto psicológico del paciente.

Pese a que Lokomat, Lopes y ARTHuR toman en cuenta la importancia de los movimientos de extensión y flexión de cadera, ninguno le da importancia a los movimientos de torso y brazos para llevar a cabo un ciclo de marcha adecuado. Probablemente, para víctimas de ACV o lesiones espinales, esto no tenga relevancia ya que, en general, estas personas pasaron por el proceso de aprendizaje de la marcha antes de adquirir su condición; sin embargo, los infantes con PC son individuos que están pasando por primera vez por este proceso, por lo que el entrenamiento adecuado de la movilidad, tanto del torso como de las extremidades superiores, mejorará el uso completo de su cuerpo para mantener el equilibrio durante la marcha.

5. REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

De acuerdo con la revisión médica de la PC, y en consecuencia con los datos obtenidos del análisis QFD, tenemos ciertos requerimientos indispensables para asegurar la funcionalidad del dispositivo.

5.1 Seguimiento de trayectoria para las extremidades inferiores

El dispositivo debe ser capaz de guiar cada una de las extremidades inferiores a través de rutas predefinidas que simulen tanto la marcha normal como trayectorias de escalado ascendentes y descendentes.

5.2 Variación del gasto energético efectuado por el individuo

En un principio, el dispositivo deberá asumir en su totalidad el esfuerzo requerido para mover las extremidades inferiores, debido a que los infantes con PC necesitan inducir la sinapsis neuronal para mecanizar estos movimientos; sin embargo, conforme la terapia progrese, el dispositivo deberá servir para fortalecer los miembros inferiores del sujeto.

5.3 Movimiento de cadera y extremidades superiores

Ciertamente, durante el proceso de marcha, el movimiento de las extremidades inferiores resalta por ser

el principal para obtener un desplazamiento del cuerpo. No obstante, el movimiento de la cadera y las extremidades superiores es crítico para alcanzar equilibrio y cadencia de paso óptimos.

5.3 Adaptabilidad del dispositivo a diferentes morfologías

Dado que la RM puede efectuarse a partir de los 18 meses de edad, el dispositivo debe abarcar un amplio rango de medidas, debido a la inherente variedad de tamaños de los miembros inferiores propia del crecimiento humano; se especifica esto para asegurar su funcionalidad para infantes de diferentes edades.

5.4 Interacción amigable con el paciente

Es necesario tomar en cuenta el aspecto psicológico en la rehabilitación integral del paciente: el sujeto requiere interacción con cierto entorno durante la RM, tanto para relacionar la actividad realizada como parte de su vida cotidiana, como para evitar el fastidio que puede ocasionar la repetitividad de los movimientos durante la terapia de rehabilitación.

6. INTERPRETACIÓN TÉCNICA DE LOS REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

El sistema estará dividido en módulos funcionales para permitir un mejor manejo técnico del equipo. Para la estructura principal se requiere un dispositivo con un sistema BWS capaz de operar en personas de un rango de edad entre los 2 y 12 años, y cuyo peso no exceda de los 70 kg. Por lo tanto, el mecanismo motor necesita ser altamente adaptable a distintas morfologías. Por ello, un sistema basado en placas de pie es la solución más viable, puesto que además permite emular trayectorias de tipo escaladora tanto ascendentes como descendentes.

La transmisión de movimiento debe tener diferentes modalidades para dosificación de la carga. Inicialmente, la prioridad con el paciente será que logre mecanizar los movimientos de marcha y, conforme la terapia progrese, el porcentaje de carga asumida por el dispositivo se irá reduciendo. De tal suerte, el dispositivo no es una simple máquina para repetición de movimientos, sino que ayudará a fortalecer los músculos del infante. Además, en la búsqueda de brindar soporte estructural a las extremidades inferiores y favorecer la correcta extensión de los músculos isquiotibiales durante la marcha, tendrá opción de adaptar ciertas órtesis a las extremidades inferiores.

Se planea dotar al sistema con un mecanismo actuador para flexión y extensión de la cadera, junto con un dispositivo actuador para las extremidades superiores, con la finalidad de enseñar al sujeto a utilizar su torso durante la marcha.

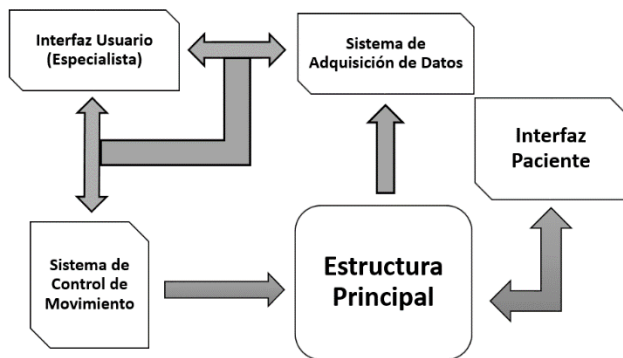


Figura 2. Distribución e interacción modular del sistema.

La interfaz del dispositivo con el paciente debe ayudar a reducir el tedio y la monotonía durante la terapia. Así, una interfaz visual que permita al paciente relacionar la RM con actividades cotidianas le ayudará a mejorar su coordinación visomotriz así como su ubicación espacial en el entorno. Para el desarrollo de esta interfaz, debe considerarse que una de las comorbilidades más comunes de la PC es el estrabismo.

El paciente deberá ser capaz de detener la operación del dispositivo en caso de cualquier imprevisto, por lo que el sistema de paros de emergencia debe considerar esta opción.

El sistema de adquisición de datos los debe proveer tanto al sistema de control de movimiento del dispositivo como a la interfaz de la máquina con el especialista responsable de conducir la terapia. Igualmente, el sistema de control de movimiento del dispositivo debe ser funcional para las diferentes trayectorias del dispositivo mencionadas anteriormente.

Por último, debe tomarse en cuenta que los datos presentados en la interfaz del especialista no solo deben ser aquellos necesarios para la operación y control del dispositivo, sino, también, aquellos utilizados para realizar un análisis del progreso de la terapia del paciente.

7. DISEÑO CONCEPTUAL

Una vez definidos los requerimientos del sistema y sus funciones principales, el siguiente paso es determinar el mecanismo motor encargado de guiar los pies del paciente. Para ello es necesario establecer la trayectoria descrita por la extremidad inferior respecto a un punto de referencia.

Tomando la cadera como dicha referencia, y considerando la pierna como un mecanismo planar con 2 grados de libertad y dos eslabones desde la cadera hasta el tobillo, si se le analiza en el plano sagital (como se muestra en la figura 3), es posible describir la cinemática directa de la pierna utilizando su matriz de transformación homogénea para obtener la posición de la

misma durante el ciclo de marcha, como muestran (1) y (2).

$$Px = L_2 \cos(q_1 + q_2) + L_1 \cos q_1 \quad (1)$$

$$Py = L_2 \sin(q_1 + q_2) + L_1 \sin q_1 \quad (2)$$

donde L_1 y L_2 son las distancias que hay de cadera a rodilla, y de rodilla a tobillo respectivamente. A su vez, q_1 y q_2 son los ángulos de rotación de X alrededor del eje Z.

Utilizando (1) y (2) se obtuvieron las curvas para distintas longitudes del miembro inferior, lo que permitió estimar la longitud de la zancada y la altura del despegue del pie durante la fase de balanceo del ciclo de marcha, para infantes de distintas edades y diferente sexo.

Finalmente, utilizando las curvas obtenidas por el modelo, se propuso un problema de optimización, con la intención de diseñar un mecanismo que se ajuste por completo a los requerimientos de diseño. Es importante resaltar que para la solución de dicho problema de optimización, se utilizan técnicas de cómputo evolutivo.

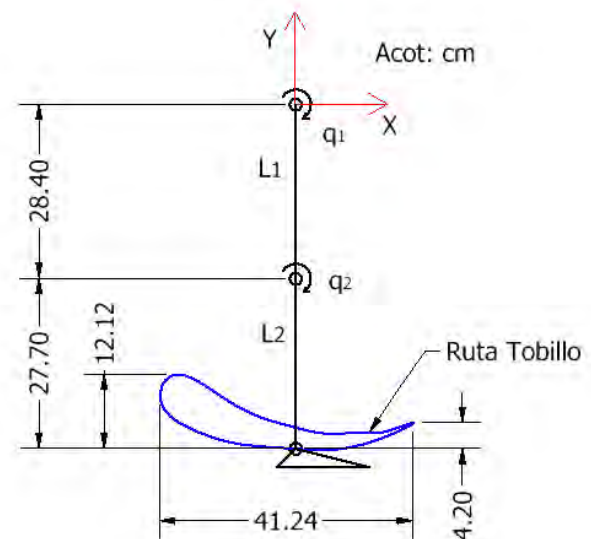


Figura 3. Modelo esquemático de la extremidad inferior de un niño varón de dos años de edad

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La marcha bípeda es uno de los procesos más difíciles de realizar en la etapa de desarrollo motriz de infantes. La capacidad de deambulación en niños con PC incrementa de manera muy destacada su calidad de vida. Por esa razón, el entrenamiento requerido para un desarrollo adecuado de dicho proceso desde edades tempranas dará a estos niños un panorama favorable a futuro en cuanto al nivel de custodia que tendrán y, sobre todo, respecto a la

independencia que puedan desarrollar durante su vida adulta. El desarrollo de sistemas de rehabilitación específicos para las necesidades de dicho padecimiento abre una ventana de oportunidad para que no sean solo los centros de rehabilitación e instituciones de salud de los grandes centros urbanos los encargados de adquirir la tecnología óptima que permita una rehabilitación de calidad.

Nótese que el análisis cinemático se hizo en el plano sagital y no se tomó en cuenta el desplazamiento de la cadera sobre el eje Y, propio del ciclo de marcha. Por tanto, esta consideración será enfatizada en trabajos futuros para determinar el mecanismo actuador para la cadera.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. E. Wood, y P. Rosenbaum, "The gross motor function classification system for cerebral palsy: a study of reliability and stability over time", *Developmental Medicine & Child Neurology*, 42(5), pp. 292-296, 2000.
2. N. Paneth, T. Hong, S. Korzeniewski. "The descriptive epidemiology of cerebral palsy". *Clin. Perinatal*, 33, pp. 251-267, 2006.
3. K. Himmelmann, E. Beckung, G. Hagberg, Uvebrant, "Bi-lateral spastic cerebral palsy-prevalence through four decades, motor function and growth". *European Journal of Pediatric Neurology*, 11: pp. 215-222, 2007.
4. M. J. Vincer, A. C. Allen, K. S. Joseph, D. A. Stinson, H. Scott, y E. Wood, "Increasing prevalence of cerebral palsy among very preterm infants: a population-based study". *Pediatrics*, 118(6), pp. 1621-1626, 2006.
5. J. F. Veneman, R. Kruidhof, E. E. Hekman, R. Ekkelenkamp, E. H. Van Asseldonk, y H. Van Der Kooij, "Design and evaluation of the Lopes exoskeleton robot for interactive gait rehabilitation". *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 15(3), pp. 379-386, 2007.
6. E. H. F. Van Asseldonk, R. Ekkelenkamp, J. F. Veneman, F. C. T. Van Der Helm, y H. Van Der Kooij, "Selective control of a subtask of walking in a robotic gait trainer (Lopes)", *IEEE 10th. International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR'07)*, pp. 841-848, 2007.
7. W. E. Ichinose, D. J. Reinkensmeyer, D. Aoyagi et al. (2003). "A robotic device for measuring and controlling pelvic motion during locomotor rehabilitation", *Proceedings of the 25th. Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 2, pp. 1690-1693, 2003.
8. K. Kubo, T. Miyoshi, A. Kanai, y K. Terashima, "Gait rehabilitation device in central nervous system disease: a re-view". *Journal of Robotics*, 2011.
9. J. L. Emken, J. H. Wynne, S. J. Harkema, y D. J. Reinkensmeyer, "Robotic device for manipulating human stepping". *IEEE Transactions on Robotics*, 22(1), 2006.
10. S. Jezernik, G. Colombo, y M. Morari, "Automatic gait-pattern adaptation algorithms for rehabilitation with a 4- DOF robotic orthosis", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 20, no. 3, pp. 574-582, 2004.
11. S. Hesse, y D. Uhlenbrock, "A mechanized gait trainer for restoration of gait". *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 37(6), pp. 701-708, 2000.
12. S. Hesse, A. Waldner, y C. Tomelleri, "Research Innovative gait robot for the repetitive practice of floor walking and stair climbing up and down in stroke patients". *J. NeuroEngineering and Rehabilitation*, 7(30), 2010.
13. E. B. Martínez, "Análisis de la espasticidad, el arco de movimiento y el control de cadera y rodilla en niños con parálisis cerebral, después del uso de ortesis robótica". *Rev. Mex. Med. Fis. Rehab.*, 25(2), pp. 54-62, 2013.
14. S. Hesse, C. Tomelleri, A. Bardeleben, C. Werner, & A. Waldner, "Robot-assisted practice of gait and stair climbing in nonambulatory stroke patients". *J. Rehabil. Res. Dev.*, 49(4), pp. 613-622, 2012.
15. R. Ávila, L. R. Prado, y E. L. González, "Dimensiones antropométricas de población latinoamericana". Universidad de Guadalajara. Centro de Investigaciones en Ergonomía. *International Standard Iso*, 7250, 1996, pp. 33-72.

CONTROL DIFUSO PARA TANQUES DE AGUA DE USO RESIDENCIAL

Fuzzy control of water tanks for residential use

RESUMEN

El presente artículo ilustra el diseño de un módulo de control basado en un microcontrolador, el cual permite regular el nivel de agua para tanques de almacenamiento de uso residencial. Se emplea un sistema de inferencia difusa para controlar un variador de velocidad encargado de operar una motobomba, en función del nivel del tanque. Se logró obtener un módulo de control fácil de operar y que compite con soluciones presentes en el mercado.

Palabras clave: control difuso, control de nivel, tanque de agua.

ABSTRACT

This article illustrates the design of a control module based on a microcontroller, which enables to regulate the level of water storage tanks for residential use. Fuzzy inference system is used to control a variable speed drive charge of operating a motor pump, depending on the level of the tank. We managed to get an easy to operate control module that competes with existing solutions on the market.

Keywords: fuzzy control, level control, water tank.

1. INTRODUCCIÓN

Desde su aparición, hace casi 50 años, la lógica difusa ha cobrado fuerza en muchas aplicaciones de diferente tipo. En particular en el área de automatización se encuentran varios trabajos que reflejan este hecho, por ejemplo, en [1] se presenta un desarrollo basado en lógica difusa a fin de automatizar el sistema de semaforización en relación a la densidad de flujo vehicular. Por esta vía, en [2] se presenta el diseño de un controlador difuso para un sistema de frenado automático y en [3] se desarrolla un sistema de inferencia difuso para la guía de un vehículo cuando el conductor presenta estados de cansancio.

En [4] se presenta una comparación entre un controlador proporcional integral y uno difuso para disminuir las variaciones de frecuencia y potencia en las líneas de transmisión de un sistema de generación de energía hidrotermal, destacando el mejor desempeño del controlador difuso. En [5] se presenta un diseño para un controlador mixto neurodifuso, con el objeto de controlar dos tanques acoplados resaltando las bondades de los sistemas difusos para operar con modelos no lineales. En [6], [7] y [8] se presentan diseños de controladores difusos para el control de nivel de un tanque en diferentes sistemas.

En los diferentes trabajos relacionados, se encuentra que los sistemas difusos son implementados o en un equipo de cómputo o en un dispositivo microcontrolado. En [10] se presenta una comparación básica de algunas

arquitecturas de microcontroladores, a fin de implementar un controlador difuso.

Todo esto refleja el potencial de la lógica difusa para aplicaciones de automatización. Debido a esto, en el presente artículo se desarrolla un controlador difuso implementado en un microcontrolador 18f2550 de microchip en torno a una aplicación de control de nivel mediante un sistema difuso.

En adelante, el documento está organizado de la siguiente forma: en la sección 2 se describe el entorno de la aplicación, en la sección 3 se describe el diseño del controlador difuso a implementar, en la sección 4 se presenta el análisis de resultados y finalmente en la sección 5 las conclusiones.

2. ENTORNO DE APLICACIÓN

En la figura 1 se ilustra el diagrama de bloques correspondiente al entorno de aplicación, en donde la entrada es agua, la cual ingresa inicialmente al tanque general subterráneo de los edificios y de donde esta es llevada mediante motobombas al tanque elevado, punto donde se desea integrar el controlador difuso.

FRANK PÉREZ

Ingeniero electrónico.
Universidad Antonio Nariño

RÓBINSON JIMÉNEZ M

Ingeniero electrónico, M. Sc.
Profesor
Universidad Autónoma de Colombia
jimenez.robinson@fuac.edu.co

DANIEL E. ÁVILA VELANDIA

Ingeniero electrónico, M. Sc.
Profesor
Universidad Autónoma de Colombia
daniel.avila@fuac.edu.co

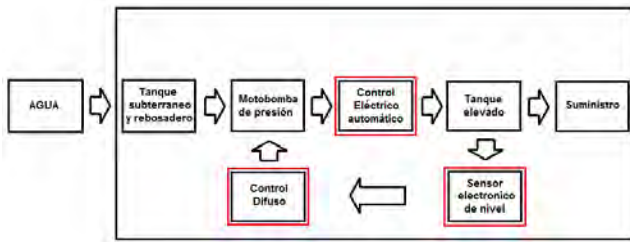


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema.

Las características típicas de los tanques de uso residencial son:

- Capacidad 2000 Lts.
- H = 1,55 mts.
- D1 = 1,22 mts.
- D = 1,52 mts.
- H1 = 0,28 mts.

La figura 2 ilustra el tipo de tanque utilizado, donde el parámetro principal de interés corresponde a la altura H, la cual determinará el universo de discurso de entrada del controlador de nivel difuso.

Este universo de discurso caracterizado dentro del microcontrolador que gobernará el proceso de control, generará una respuesta del mismo al producirse el consumo de agua desde el tanque. Esta respuesta corresponde a la salida defuzificada del controlador, la cual comandará un variador de velocidad, que mediante el sistema trifásico regula el estado de la motobomba de llenado del tanque.

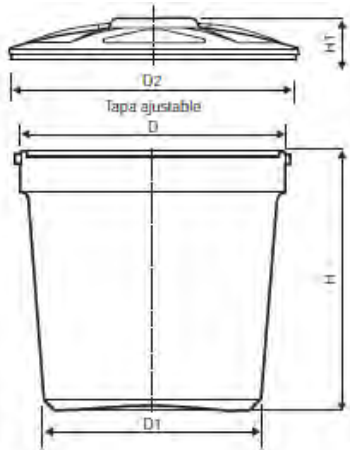


Figura 2. Tanque de agua de uso residencial.

En la figura 3 se ilustra el diagrama de bloques general de la etapa de control de la motobomba.

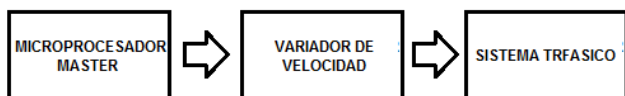


Figura 3. Diagrama de bloques del actuador.

La motobomba utilizada tiene las siguientes características:

- Centrífuga de eje horizontal para 3600 R.P.M.
- Motor eléctrico tipo jaula de ardilla a prueba de humedad.
- Tensión conmutable de 220 a 440.
- Motor con capacidad de 2.5 HP.
- Caudal 14.38 Litros/segundo.
- Presión en la descarga de 69.65 Metros de columna de agua.
- Tubería de succión de 3".

En función al consumo de corriente y la potencia de la motobomba, es posible escoger el calibre de cable apto para el buen desempeño del montaje trifásico. De aquí los cálculos para determinar el consumo de corriente, se realizan teniendo en cuenta que la conexión del motor es Delta y partiendo de la Eq. (1).

$$V_L = V_f = 220V$$

$$P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \phi \quad (1)$$

Donde:

P = Potencia

V_L = Voltaje de línea

V_f = Voltaje de fase

Cos ϕ = Angulo de desfase = 1

Como la potencia del motor está dada en caballos de fuerza (HP), y dado que un HP equivale a 746W, se tiene:

$$P = 2,5 \text{ hp} \cdot 746W = 1,86 \text{ Kw}$$

Por lo que despejando de la Eq. 1, se tiene para hallar la corriente que:

$$I_L = P / (\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos \phi)$$

$$I_L = 4,88 \text{ A} \approx 5 \text{ A}$$

De acuerdo con los cálculos obtenidos, es posible realizar la selección de los elementos necesarios para la instalación trifásica. El sistema trifásico de este proyecto cuenta con los siguientes elementos.

- Relés de estado solido
- Guardamotor
- Fusible trifásico
- Relé térmico
- LCD gráfica
- Elaboración de circuito impreso
- Microcontroladores
- Contactores
- Variador de velocidad Schneider

En la figura 4 se representa el acople del sistema lógico con la potencia trifásica que maneja el motor, con ayuda

del variador de velocidad que finalmente es el encargado de controlar las velocidades del motor, de acuerdo al nivel de agua que hay en el tanque.

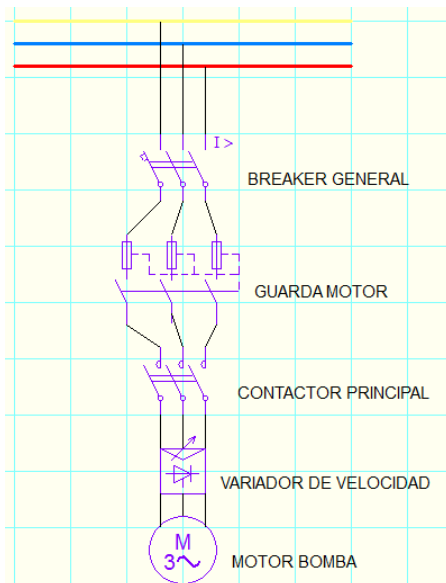


Figura 4. Sistema trifásico motobombas.

3. CONTROLADOR DIFUSO

Como se mencionó, del parámetro H, que corresponde a la altura del tanque, se establece el universo de discurso de entrada. Teniendo que se toma una entrada analógica del microcontrolador para disminuir el número de conexiones, se puede establecer una variación continua que interprete el microcontrolador y extrapole directamente al universo de discurso, el nivel de agua en el tanque. Para ello se establece las siguientes relaciones:

1. Nivel alto >1.4 mts. equivalente a 4.7 Voltios
2. Nivel medio alto 1.3 mts. equivalente a 4,3 Voltios
3. Nivel medio 1,2 mts. equivalente a 4,0 Voltios
4. Nivel medio bajo 1,1 mts. equivalente a 3,7 Voltios
5. Nivel bajo < 0,95 mts. equivalente a 3,2 Voltios

Denotando cada nivel con las etiquetas lingüísticas B para bajo, MB para nivel medio bajo, M para nivel medio, MA para nivel medio alto y A para el nivel alto. Esto en un universo de discurso cuyo rango va de 0 a 5. La figura 5 ilustra el universo de discurso de entrada según las relaciones establecidas.

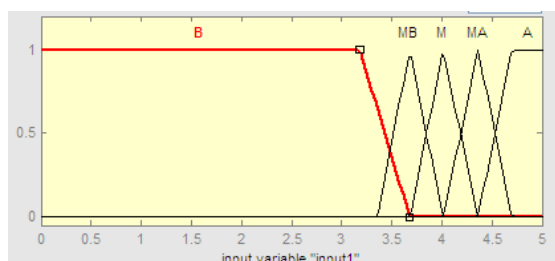


Figura 5. Universo de discurso de entrada.

Se puede apreciar que la prioridad es mantener lleno el tanque por más consumo que se produzca, esto hace que la etiqueta lingüística B, tenga un soporte mayor al de las demás. La figura 6 ilustra el universo de discurso de salida determinado por la experiencia de algunos de los operarios de sistemas tradicionales que trabajan con variadores de velocidad.

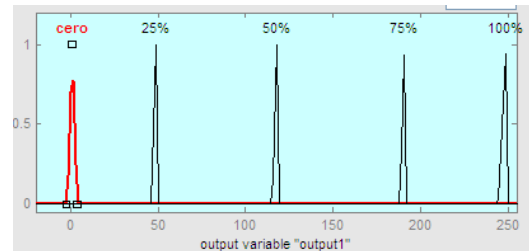


Figura 6. Universo de discurso de salida.

El conjunto de reglas utilizado, correspondiente al error del nivel actual del tanque con el deseado, el cual será configurable, está determinado por las siguientes relaciones:

If (error es bajo) and (nivel alto) then (señal de salida cero).

If (error es medio bajo) and (nivel medio alto) then (25% señal de salida).

If (error es medio) and (nivel medio) then (50% señal de salida).

If (error es medio alto) and (nivel medio bajo) then (75% señal de salida).

If (error es alto) and (nivel bajo) then (100% señal de salida).

Para implementar estas reglas de inferencia en el microcontrolador, se utiliza el algoritmo de inferencia mamdani, que se ilustra en la figura 7.

1. Compute the degree of fulfillment for each rule by: $\beta_i = \max_x [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{A_i}(x)]$, $1 \leq i \leq K$. Note that for a singleton set $(\mu_{A'}(x) = 1 \text{ for } x = x_0 \text{ and } \mu_{A'}(x) = 0 \text{ otherwise})$ the equation for β_i simplifies to $\beta_i = \mu_{A_i}(x_0)$.
2. Derive the output fuzzy sets B'_i : $\mu_{B'_i}(y) = \beta_i \wedge \mu_{B_i}(y)$, $y \in Y$, $1 \leq i \leq K$.
3. Aggregate the output fuzzy sets B'_i : $\mu_{B'}(y) = \max_{1 \leq i \leq K} \mu_{B'_i}(y)$, $y \in Y$.

Figura 7. Algoritmo de inferencia Mamdani. [10].

La salida de control para el variador corresponde a la defuzzificación de las reglas activadas, para el caso se opta por el método de centro de gravedad (CoG), ilustrado en la Eq. 2.

$$y' = \frac{\sum_{j=1}^F \mu_{B'}(y_j) \cdot y_j}{\sum_{j=1}^F \mu_{B'}(y_j)} \quad (2)$$

Este método de defuzzyficación permite que el resultado obtenido, para una activación de reglas determinada, cubra la mayor parte del universo de discurso de salida, para el caso del COG se tiene del 2 al 97 por ciento, mientras que otros métodos convencionales como el medio de los máximos MOM, permite obtener del 3 al 95,4 por ciento.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El sistema fue implementado en un microcontrolador de la familia PIC 18 de microchip, programado en lenguaje C. Se diseñó una interfaz de visualización para una LCD gráfica, que permitiese al operador establecer los parámetros de configuración para cualquier tipo de tanque y del nivel de llenado deseado. La figura. 8 ilustra el ambiente de simulación del algoritmo de control implementado.

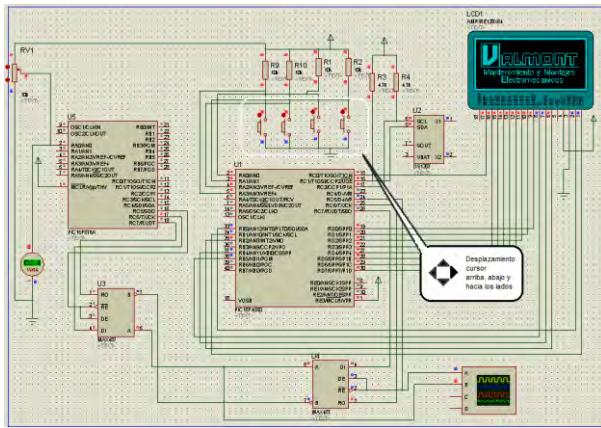


Figura 8. Simulación de algoritmo de control.

El operador puede acceder al sistema mediante un panel de comando, formado por cuatro botones, que permiten el desplazamiento del cursor en la LCD gráfica y navegar en los diferentes menús de configuración. La Fig. 9 ilustra el diagrama de bloques del sistema de programación del módulo, el cual incluye la configuración de un módulo de temporización basado en un reloj de tiempo real Ds1307.

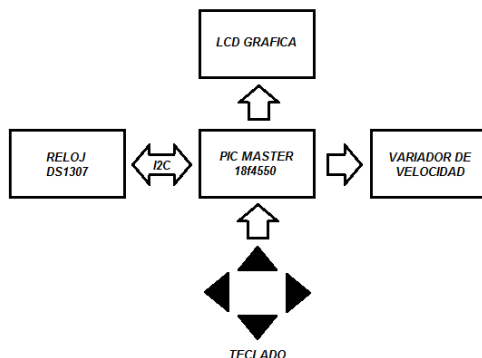


Figura 9. Diagrama de bloques del sistema de programación del módulo.

Los menús de navegación son cuatro, como se ilustra en la figura 10. El primer menú permite configurar las características del tanque y del controlador, el segundo permite configurar el Ds1307 para ajustar hora y fecha, el tercero el menú de supervisión y el cuarto la configuración de alarmas por fallo.

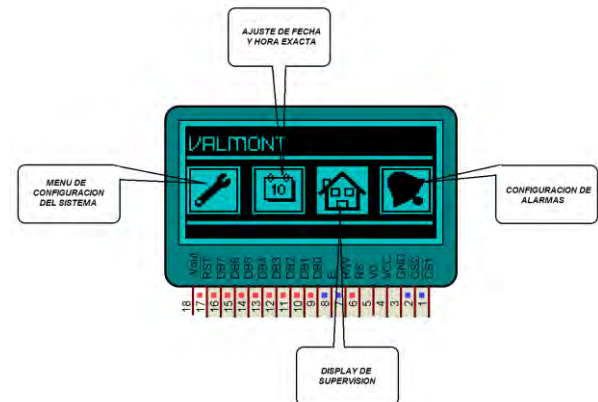


Figura 10. Menús de configuración del módulo.

El menú de configuración del tanque (Fig. 11) permite establecer las características del mismo a fin de tener un sistema genérico, ante el cual el universo de discurso de entrada se extrapole.

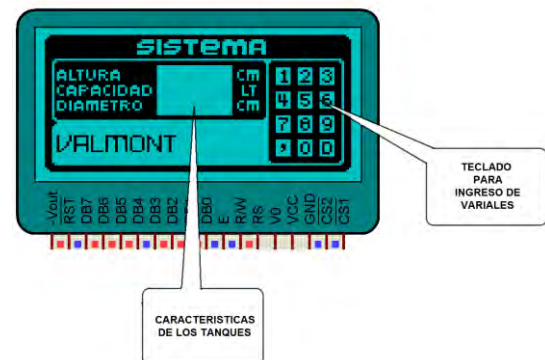


Figura 11. Menú de configuración del tanque.

Calculando el tiempo de llenado del tanque de acuerdo a las características técnicas de la motobomba, es decir, un volumen del tanque de 2000 lts y un caudal de la motobomba de 14,38 litros por segundo, se tiene:

$$Q = V/t$$

$$t = V/Q$$

$$t = (2000 \text{ lts}) / (14,38 \text{ lts/s})$$

$$t = 139 \text{ seg} \approx 2,3 \text{ min}$$

Donde se puede evidenciar que el proceso es lento frente a la ejecución de tiempos del microcontrolador, la cual en función a un oscilador de 20 MHz está por debajo de los 50 milisegundos.

La figura 12 ilustra el dispositivo final ya ensamblado, las pruebas de funcionamiento permitieron establecer

tiempos reales de llenado desde la condición de vacío, de 3, 1 minutos, que se debe a los retrasos en la activación, transporte del agua al tanque (altura del edificio) y la gravedad.



Figura 12. Dispositivo final.

Pruebas con diferentes operarios permitieron establecer la fácil configuración del módulo. Así mismo, pruebas de medio vaciado del tanque permitieron evidenciar la acción oportuna y correcta del controlador, con errores de estado estacionario de máximo un 6 % del nivel de llenado, derivados de errores en la medición por turbulencia del agua e imposibilidad de compensar errores negativos por parte del sistema. No siendo significativo para el tipo de aplicación.

5. CONCLUSIONES

Las pruebas realizadas con el sensor de ultrasonido SFR05, utilizado para medir el nivel de agua de los tanques e instalado en la parte superior del mismo, presenta una respuesta eficiente al continuo monitoreo del nivel. No se presentan errores de medición producidos por la misma estructura física del tanque, evitando una respuesta incorrecta del sistema difuso respecto al encendido del motor.

El microcontrolador utilizado trabaja con un 60% de la capacidad de su memoria, más por el manejo de la LCD gráfica que por los algoritmos de inferencia difusa. El tiempo de respuesta en el procesamiento es más que suficiente debido a la naturaleza lenta del proceso de control de nivel.

El uso de la LCD gráfica, y del teclado desarrollado en función a cuatro botones, permiten el manejo total de la configuración del dispositivo. Haciendo que el sistema sea fácil de utilizar y más económico, comparado con un PLC que es uno de los dispositivos convencionales para desarrollar este tipo de aplicaciones.

El encendido y apagado del motor con arranque y reducción de velocidad suave cuenta con un variador de velocidad que elimina el uso de electroválvulas, dado que

el sistema difuso controla directamente el motor. Debido a que el sensor de ultrasonido presenta una variación de voltaje proporcional facilitando la fuzificación y control del variador de velocidad, el motor sólo se acciona cuando el nivel de agua disminuye, reflejándose como mayor eficiencia en el sistema.

N. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Jiménez Moreno Robinson, Avilés Sánchez Óscar, Espinosa Fabio y Gordillo, Camilo. Machine Vision algorithms applied to dynamic traffic light control. *Revista Dyna* ISSN: 0012-7353 ed: Universidad Nacional de Colombia, v.80 fasc.180 p.56 - ,2013.
- [2] Hirulkar, S.; Damle, M.; Rathee, V.; Hardas, B., Design of Automatic Car Breaking System Using Fuzzy Logic and PID Controller, *Electronic Systems, Signal Processing and Computing Technologies (ICESC)*, 2014 International Conference on , vol., no., pp.413,418, 9-11 Jan. 2014.
- [3] Ogawa, Takayuki; Shibuya, Takeshi; Yasunobu, Seiji, *An intelligent guide vehicle by fuzzy guide target considering tiredness*, SICE Annual Conference (SICE), 2013 Proceedings of , vol., no., pp.2530,2535, 14-17 Sept. 2013.
- [4] Bhateshvar, Yogesh Krishan; Mathur, H.D., *Frequency Stabilization for Thermal-Hydro Power System with Fuzzy Logic Controlled SMES Unit in Deregulated Environment*, Advanced Computing & Communication Technologies (ACCT), 2014 Fourth International Conference on , vol., no., pp.536,540, 8-9 Feb. 2014.
- [5] Torres-Salomao, L.A.; Anzurez-Marin, J., *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Control for a Two Tanks Hydraulic System model*, Power, Electronics and Computing (ROPEC), 2013 IEEE International Autumn Meeting on , vol., no., pp.1,5, 13-15 Nov. 2013.
- [6] Jiménez Moreno Robinson, Avilés Sánchez Óscar, Espinosa Fabio, *Level measurement comparison between 3D vision system based on Kinect and ultrasonic industrial sensor*. Asian Transactions on Engineering ISSN: 2221-4267 ed: v.2 fasc.5 p.10 - 19 ,2012.
- [7] Li Liang; The application of fuzzy PID controller in coupled-tank liquid-level control system," *Electronics, Communications and Control (ICECC)*, 2011 International Conference on , vol., no., pp.2894-2897, 9-11 Sept. 2011.
- [8] Zhuo Wang; Qiang Wang, "Application of fuzzy controller in drum water-level control, *Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC)*, 2011 International Conference on , vol., no., pp.174-176, 19-22 Aug. 2011.
- [9] Jiménez Moreno Robinson, Avilés Sánchez Óscar, Ramos Sandoval Olga, *Análisis de la implementación de un controlador difuso sobre diferentes arquitecturas de hardware*. Ciencia e

Ingeniería Neogradanida ISSN: 0124-8170 ed: v.23
fasc.1 p.77 - 87 ,2013.

- [10] Babuska Robert, *Fuzzy and Neural Control DISC Course Lecture notes*. Delft University of Technology. Sept 2004.

IDENTIFICACIÓN, MODELADO Y CONTROL DE UN MOTOR DC SENSADO CON UN TACOGENERADOR

Identifying, Modelling and Controlling a DC Motor with a Sense Tachogenerator

RESUMEN

En este artículo se abordan los temas de caracterización de un motor de corriente continua, en donde su sensor es un tacogenerador. Esta metodología se hace por medio de la identificación del motor, con el uso de los algoritmos de inteligencia artificial que provee el Toolbox de Ident de Matlab. Se hace una descripción desde el control clásico, para abordarlo posteriormente desde el control digital.

Palabras clave: control de velocidad, circuitos de retroalimentación, diseño de control, sistemas en lazo cerrado, variables de control mecánico.

ABSTRACT

This article aims to characterize a DC motor, using a tachometer as the sensor. This methodology is made through the motor identification using artificial intelligence algorithms provided by the Matlab toolbox Ident. A description is made from the classic control, later to be approached from the digital control.

Keywords: closed-loop systems, control design, feedback circuits, mechanical control variables, velocity control.

JUAN S. CELY G.

Estudiante de Ingeniería
Mecatrónica
Grupo de Investigación DaVinci
Universidad Militar Nueva Granada
u1801260@unimilitar.edu.co

ÓSCAR RUBIANO

Ingeniero mecatrónico
Asistente de investigación
Grupo de Investigación DaVinci
Universidad Militar Nueva Granada
oscar.rubiano@ieee.org

1. INTRODUCCIÓN

Sucede muchas veces en la industria que, al tener que hacer un control de una de las tantas variables físicas que se manejan, se tiene que recurrir al aprovechamiento de algoritmos de inteligencia artificial, para poder obtener un modelo físico que logre representar la planta que debe ser tratada.

En el caso de los sistemas evaluados con una única entrada, el reconocimiento de salida por identificación se hace de manera sencilla; sin embargo, para tener una identificación más exacta, es necesario hacer una variación en su entrada, como ocurre con el uso de ruido blanco gaussiano.

Si bien los procesos por los cuales los algoritmos de identificación necesitan tener cambios de frecuencia para determinar la robustez por medio del modelo, esto permite tener una respuesta muy fiel a la dinámica del sistema sin tener que recurrir a un modelamiento matemático más estricto [1].

Cuando los algoritmos de identificación requieren señales de gran complejidad, se recurre a algoritmos que en su estructura usan la transformada Wavelet, o de tipo autorregresivos, como ARX, ARMAX, BJ, etc.; incluso en casos se puede llegar a usar redes neuronales sobreentrenadas [2].

De todos los resultados de un proceso de identificación, el resultado siempre se lleva a control; obviamente, esto genera la necesidad de una validación del control

propuesto [3]. En los casos más leves se hace la validación con un control de tipo PID, pero en pruebas que requieran más robustez exigen un control embebido y todo este proceso se hace generando una muestra de *Software in The Loop* para no tener que sintonizar controladores físicos cada vez que el modelo se somete a cambios.

Una de las aplicaciones más grandes de la identificación en la industria ocurre cuando un proceso está en funcionamiento; esto requiere si se desea realizar un modelamiento del proceso para posteriormente implementar un controlador, también es necesario hacer un estudio minucioso que puede acarrear muchos gastos. Con el objetivo de minimizar este impacto, el proceso de reconocimiento puede contribuir con la identificación sin generar gastos innecesarios [4].

Desde el punto de vista experimental, el método que se llevó a cabo forma parte del desarrollo experimental de la ingeniería actual. En este artículo se encontrará, como una primera sección, el trabajo previo de la identificación, el control digital, para luego ser desarrollado en una descripción de la metodología. El artículo finaliza con las conclusiones y los trabajos futuros.

2. TRABAJO PREVIO

2.1 Identificación de sistemas

La identificación de sistemas nace con la necesidad de conocer el modelo físico que represente la dinámica real

del sistema, aunque se identifique un modelo aproximado al real. En un principio, esta identificación se hacía bajo prueba y error, o se proyectaban los resultados a nivel estocástico. Hoy en día estos procesos requieren niveles computacionales mucho más altos, debido a que en su mayoría requieren algoritmos de inteligencia artificial [5].

En la imagen 1 se puede observar un proceso de identificación usado en el Toolbox de Matlab. Sin embargo, no es la única manera de lograr un proceso de identificación, ya que existen varios métodos para lograrlo por medio de *software* de reconocimiento conocidos en todo el mundo [6].

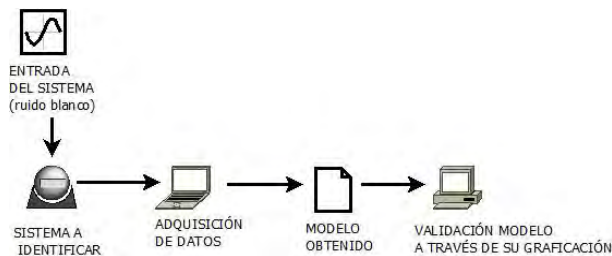


Imagen 1. Esquema general del proceso de identificación.

El esquema anterior se puede generalizar para la mayoría de los casos; sin embargo, para el caso práctico con el que se elaboró la práctica, se realizó con el uso de algoritmos Armax con una interfaz en el Toolbox de Identificación de Matlab.

2.2 Control digital

El diseño en tiempo discreto de un controlador conserva los principios básicos del control en tiempo continuo. Sin embargo, el desarrollo matemático hace que varíen los resultados obtenidos, y se tengan en cuenta más componentes en su desarrollo [7]. Es importante que el control digital esté basado en la toma de datos en tiempo discreto, y el tiempo entre cada uno de las tomas es fundamental, tiempo denominado “tiempo de muestreo”.

En el caso del esquema general de un controlador digital, la planta siempre trabaja en modo continuo. Una planta digital no es común que exista en la vida real. En este sentido, el esquema expuesto en la imagen 2 expone la estructura que se generaliza en un esquema de tipo digital.

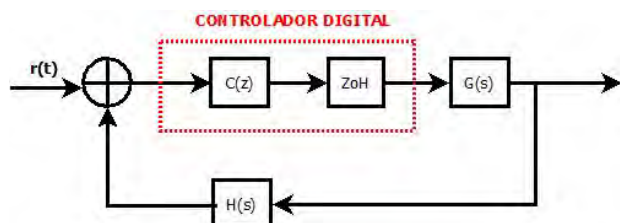


Imagen 2. Esquema generalizado de control digital.

2.3 Controlador pid digital

Un controlador PID describe un método de control enmarcado dentro de la teoría clásica del control, el cual lleva la dinámica del sistema a un comportamiento que se desea. En ningún momento un controlador PID modifica la dinámica del sistema a controlar, sino que fuerza a responder el sistema de una manera determinada.

La ecuación característica de un PID en tiempo continuo se describe en (1), donde se puede observar que la respuesta puede tener múltiples soluciones, debido a la combinación ideal de las constantes.

$$G(s) = K_p + K_D * s + K_i s$$

Ecuación 1. Esquema general de un PID

Para este caso, el diseño no se hizo desde el control digital, sino desde el control continuo y luego se mapeó al control digital. Este proceso se denomina discretizar [8]. Esto se obtiene de muchos métodos, pero el método que se usó aquí fue igualar el tiempo al evento por el tiempo de muestreo, denotado con T.

$$f(t), t = K * T$$

Ecuación 2. Función en el tiempo aproximada a discreto.

Para el caso de la obtención de la derivada se hace el uso de diferencias divididas hacia atrás, para lograr que se pueda obtener una representación de la derivada del sistema. Esta debe tener en cuenta el tiempo de muestreo y se puede visualizar su tratamiento en la ecuación 3.

$$\frac{df(t)}{dt} = \frac{1}{T} (f(KT) - f[(K-1)T])$$

Ecuación 3. La derivada de la función en tiempo discreto.

Después de obtener una representación en diferencias divididas, esta se tiene que llevar a la representación en zeta con el objetivo de ser visualizado en los esquemas de control por eventos discretos. En la ecuación 4 se puede visualizar el tratamiento matemático que se le da a la función, siendo así la forma de cómo se obtuvo el modelamiento de su comportamiento.

$$Z \left(\frac{df(t)}{dt} \right) = \frac{1}{T} (1 - z^{-1}) * F(z) = \frac{z - 1}{Tz} * F(z)$$

Ecuación 4. Transformada zeta del tiempo discreto.

Esto conlleva a que todos los comportamientos derivativos de la función de transferencia final del controlador dependan directamente de una discretización del operador complejo s.

3. METODOLOGÍA

Con la metodología utilizada para el desarrollo de esta práctica se tuvieron en cuenta tres etapas fundamentales en el proceso. La primera fue la identificación por medio del ToolBox de Matlab, haciendo uso de algoritmos de tipo ARMAX. La segunda parte consistió en generar un control al motor cumpliendo con unos requerimientos propuestos en tiempo continuo y la tercera fue la validación en tiempo discreto.

3.1 Caracterización del motor

La caracterización del motor se llevó a cabo por medio de una toma de datos por medio de la lectura de un osciloscopio tanto en modo gráfico como en la acumulación de datos en una hoja de datos separado por comas, también denominado como “Archivo con formato” CVS. La mayoría de los dispositivos de instrumentación digital modernos permiten salvar esa información en dicho formato. Y de ahí se hace la obtención necesaria.

En la imagen 3, se puede visualizar que el tiempo de levantamiento del motor ronda en alrededor de 300 a 400 ms, esto característico a un motor DC tradicional. Estos valores leídos se obtienen de acuerdo con un tacogenerador conectado al eje de manera paralela y conjunta. Para el caso de la práctica este tacogenerador facilitó las mediciones debido a tener una tipología similar al del motor a controlar.

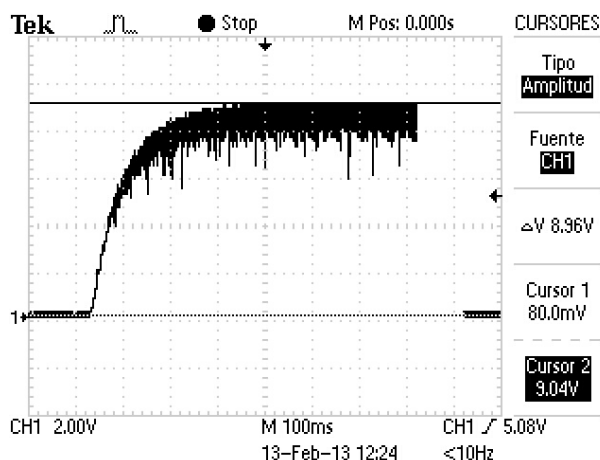


Imagen 3. Imagen obtenida en un osciloscopio del comportamiento del motor.

Después del procedimiento de poder almacenar estos datos se llevan en el archivo separado por comas. Esto con el objetivo de poder ser almacenado en variables en Matlab y poderles hacer el tratamiento necesario para su identificación y posterior control.

De acuerdo con este orden de ideas, se lleva a cabo la validación del proceso de identificación graficando la señal obtenida en la variable almacenada en Matlab. En

la imagen 4 se grafica esa información y se puede hacer la comparación entre los dos valores.

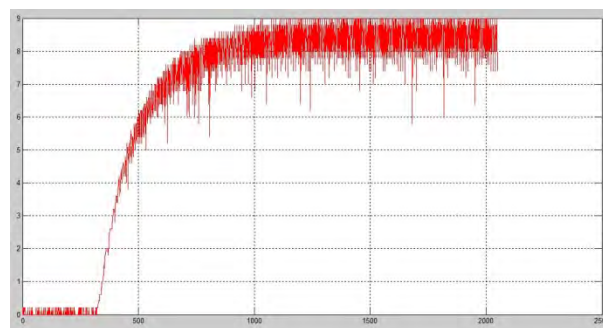


Imagen 4. Señal obtenida desde Matlab, del archivo separado por comas.

Validando esta información y haciendo el proceso de identificación, ya se procede a hacer la propuesta del control. Para ello se requiere el control, y este a su vez requiere del modelo característico obtenido del motor, a partir de la variable en Matlab.

En la imagen 5 se puede visualizar el aparte del proceso de identificación, en donde la elección puede ser tanto en tiempo continuo como en tiempo discreto. Para esto solo se configura el resultado a obtener y se puede ya visualizar el resultado.

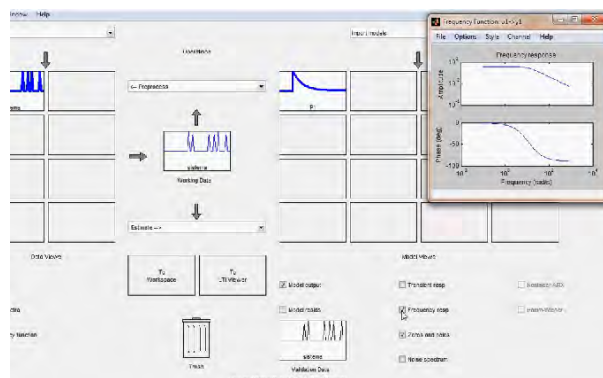


Imagen 5. Proceso de identificación en el ToolBox de Identificación de Matlab, imagen ofrecida en la ayuda de Matlab[5]

Los resultados del proceso de identificación pueden ser tan variantes que todo depende del proceso que la identificación permita obtener. Esto puede dar como resultado una identificación muy fiel a la dinámica del sistema como tener una identificación precaria y alejada de la realidad.

3.2 Simulación del control

Para este paso de la obtención de unas constantes para el funcionamiento deseado en el proceso de diseño de control, se llevó más que por el análisis matemático, a

una conclusión desde el punto de vista del lugar geométrico de las raíces, tratando de llevar los polos del sistema en lazo abierto a polos deseados ubicados en el lugar geométrico de las raíces.

Los polos que se requieren para el diseño se eligieron arbitrariamente, pero que estén contenidos en el lugar geométrico de las raíces [9]. Cada elección puede depender de los usos que se les dé al proceso, o la aplicación que se requiera implementar.

La obtención de los polos del sistema son representados en la ecuación 5, que a su vez tiene como lugar los valores obtenidos de la interpretación del modelo, que para este caso no se es necesario en su representación, debido a que se trabaja con el lugar geométrico de las raíces.

$$\begin{aligned}s_1 &= 0 \\ s_2 &= -0.0006 \\ s_3 &= -14.5494\end{aligned}$$

Ecuación 5. Polos Representativos del polinomio característico del modelo obtenido por Ident en Matlab.

En el caso de la representación del lugar geométrico de las raíces, la visualización se hace por medio de Matlab, y es obtenida de parte del modelo previamente caracterizado y se puede observar en la imagen 6, en donde se ve claramente que los dos polos más dominantes están muy cercanos al origen del plano complejo.

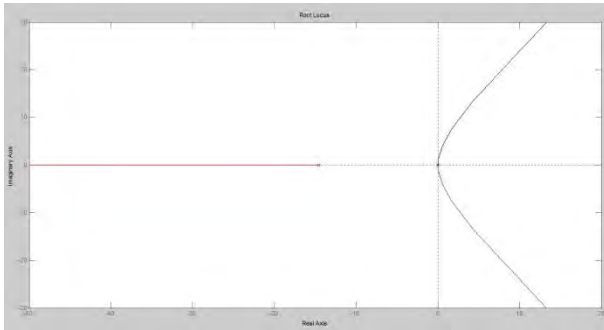


Figura 5. Lugar geométrico de las raíces del sistema sin controlar.

De acuerdo con los criterios que se quieren para el control sobre el sistema, se elige que el sistema trabaje de acuerdo con una dinámica seleccionada que para este caso es el de un sistema críticamente amortiguado. Para que esta condición se cumpla se debe llevar a que los polos del sistema estén repetidos y tengan un solo componente real negativo y cuyo componente imaginario no exista; lastimosamente, esta condición está limitada si esa condición se ve visible en el lugar geométrico de las raíces que por fortuna se cumple en este caso. Los valores obtenidos del recorrido que se hace por el lugar

geométrico de las raíces evidencian que este valor corresponde a los que se relacionan en la ecuación 6. Hacer que el controlador lleve al sistema a cumplir con esta dinámica, no significa que cambie la dinámica del sistema, simplemente la va a forzar dentro de su rango de trabajo.

$$s_{1,2} = -0.000296$$

Ecuación 6. Polos finales y deseados del sistema controlado.

Ya obtenidos los valores de los polos, se tiene que proceder por obtener el valor de la función de transferencia del PID, que para este caso está en tiempo continuo, relacionada en la ecuación 7.

$$PID(s) = \frac{s^2 + 0.000592 * s + 0.000000087616}{s}$$

Ecuación 7. Función de transferencia del PID

De acuerdo con esta función de transferencia e igualándola a la función de transferencia característica del PID, nos dan valores de las constantes que deben ser realimentadas para tener los valores en el PID, estas son expresadas en la ecuación 8.

$$K_D = 1689 \quad K_P = 0.000592 \quad K_I = 0.000148$$

Ecuación 8. Cálculo de ganancias por cada operador del PID.

Con estos valores se procede a hacer la validación de los polos a obtener, y siendo así se grafica su representación en lugar geométrico de las raíces visualizado en la imagen 6. Para este caso el lugar geométrico de las raíces muestra como dos polos rigen la dinámica forzada del sistema vista desde el PID. En la figura 7 se puede observar que los polos que se generaron en la planta corresponden a los que se tienen que tener para tener una respuesta de tipo críticamente amortiguada.

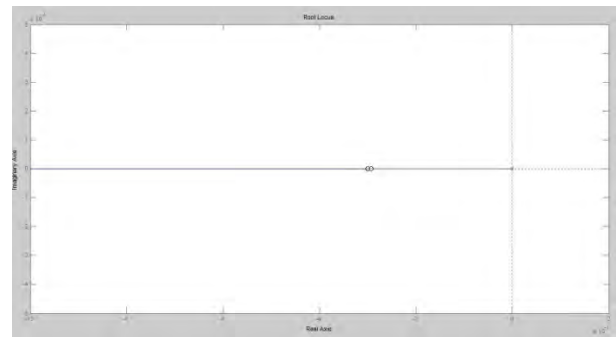


Imagen 6. Polos generados del PID.

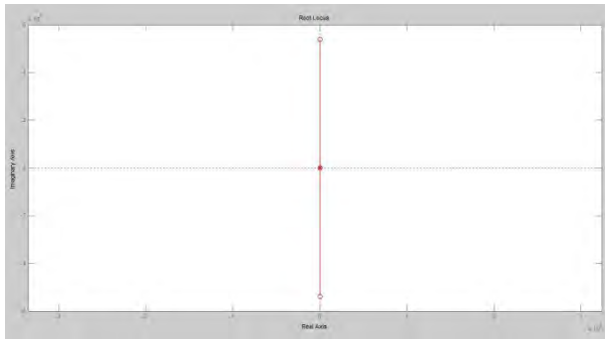


Imagen 7. Polos finales forzados en el sistema a controlar.

De acuerdo con esta información, tendría las condiciones necesarias para poder ser un sistema totalmente controlado y cumpliendo los requerimientos a los cuales el control lo va a poner a trabajar. Sin embargo, en Matlab se lleva a la gráfica con una entrada de escalos unitario para validar esa información, en donde el comportamiento final de la simulación del sistema se evidencia claramente en la imagen 8.

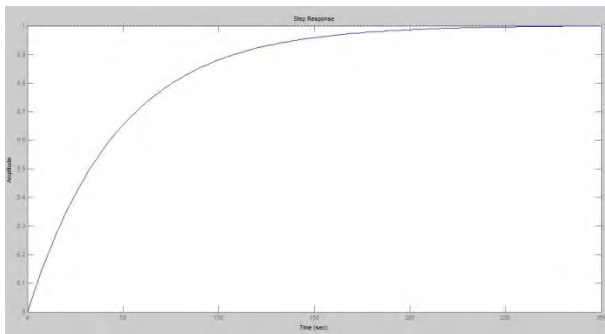


Imagen 8. Sistema controlado.

3.3 Implementación del control

Ya con el sistema y el controlador simulados, se procede a implementar un sistema netamente controlado, el cual tendrá un esquema de adquisición de datos tradicional, que cuenta con envío por protocolo de comunicación serial usando un módulo RS232, y con el manejo desde un microcontrolador PIC18F4550. Dicho sistema se puede visualizar en la imagen 9.

El sistema también requiere una interfaz para posibilitar la comunicación entre el computador y el microcontrolador, así se logran visualizar los valores que se manejan. Esta GUI de manera inicial no cuenta con un graficador para tener el seguimiento del comportamiento del esquema de control.

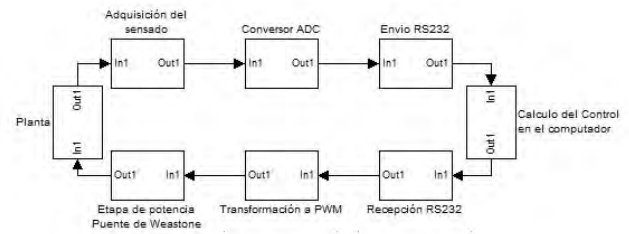


Imagen 9. Esquema general del control propuesto en diagrama de bloques.

En el caso de la ecuación característica de control, se evidencia la relación entre la señal de control y la señal de error que tiene que ser llevada a una representación en eventos discretos, ecuaciones en diferencia, en donde se procede a hacer su programación en el microcontrolador [10].

El microcontrolador debe iniciar apoyado con la ecuación característica del PID, pero el desarrollo se denota cuando se lleva a representación en ecuaciones en diferencias (visualizadas en la ecuación 9) y posteriormente todo su desarrollo matemático. La ecuación 10 demuestra su notación en términos de derivadas, mientras que la ecuación 11 lleva esta representación a ecuaciones en diferencia, que equivale a la ecuación de control, al cual permite ser programada en el microcontrolador.

$$\frac{C(s)}{E(s)} = \frac{K_D K_P * s^2 + K_P * s + K_I K_P}{s}$$

Ecuación 9. Ecuación controlador en tiempo continuo.

$$c(t)' = K_D K_P * e(t)'' + K_P * e(t)' + K_I K_P * e(t)$$

Ecuación 10. Ecuación en derivadas.

$$c(k) = c(k-1) + \frac{K_D K_P}{T} * (e(k) - 2 * e(k-1) + e(k-2)) + K_P * (e(k) - e(k-1)) + T * K_I K_P * e(k)$$

Ecuación 11. Representación en ecuación en diferencias.

Para la elección del tiempo de muestreo se lleva a cabo el cumplimiento del enunciado de Nyquist-Shannon, en el cual nos enuncia que podemos trabajar a no menos de una frecuencia que sea dos veces la frecuencia para establecer el sistema, entendido de acuerdo con la versión aplicada al control y no con la de muestreo de señales en general[11].

Si tener un sensor de posición como un encoder, se tiene que por medio de la velocidad, se puede hacer un sensado indirecto de la posición. Este se lleva a cabo en el desarrollo expuesto en la ecuación 13.

$$w(k) = \frac{\theta(k) - \theta(k-1)}{T}$$

Ecuación 13. Principio de diferencias divididas hacia atrás.

$$\theta(k) = T * w(k) + \theta(k - 1)$$

Ecuación 14. Obtención del ángulo por medio de la medida indirecta.

La obtención de los valores seleccionados se hace por medio del *software* realizado en C#, con el cual se obtiene valores de prueba a nivel numérico, este se puede visualizar en la imagen 10. El comportamiento final lo tiene el sistema en físico visualizado en el osciloscopio.

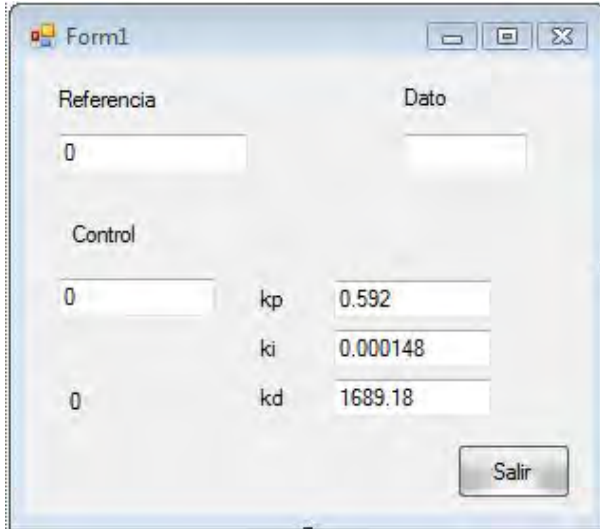


Imagen 10. Esquema general del GUI.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Dentro de los resultados esperados se enmarca el poder llevar el control de un sistema en tiempo continuo, pero siendo controlado en tiempo discreto. Esto se puede lograr de dos maneras, bien sea haciendo todo el diseño en tiempo discreto o haciendo el diseño en tiempo continuo y discretizar el controlador, que fue el que se implementó en este trabajo.

El desarrollo de este trabajo se ve limitado a la necesidad de proponer nuevas estrategias de control que tengan en cuenta el diseño en continuo, independientemente del comportamiento en discreto. Esto con el fin de evitar los errores digitales, que alteran el resultado.

Para una manipulación de la planta se propone que el acondicionamiento de la misma sea con una posibilidad directa de inversión de giro, y tener un GUI con gráfica incluida.

5. BIBLIOGRAFÍA

[1] M. Nitta and S. Hashimoto, "Identification and control of precision XY stages with active vibration

suppression system," in *Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. 13th*, 2008, pp. 932–937.

- [2] Z. Wang and X. Zhang, "Using neural network realize the identification of nonlinear system," in *2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering (ICEICE)*, 2011, pp. 3777–3779.
- [3] M.-F. Tsai and Y.-Y. Tzou, "Design and implementation of a real-time identification system using parallel processing technique for adaptive control of a DC motor drive," in *Proceedings of the 1995 IEEE IECON 21st International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*, 1995, 1995, vol. 2, pp. 818–823 vol.2.
- [4] T. Liu, K. Yao, and F. Gao, "Identification and Autotuning of Temperature-Control System With Application to Injection Molding," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 17, no. 6, pp. 1282–1294, Nov. 2009.
- [5] "System Identification Toolbox – MATLAB." [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/products/sysid/>. [Accessed: 11-Mar-2014].
- [6] "Linear Model Identification - System Identification Toolbox for MATLAB & Simulink." [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/products/sysid/description3.html>. [Accessed: 11-Mar-2014].
- [7] K. Ogata, *Modern Control Engineering*. Pearson Education, 1998.
- [8] B. Kuo, *Automatic Control Systems*, Seventh. Prentice Hall, 2004.
- [9] P. R. Ouyang, V. Pano, and T. Dam, "PID contour tracking control in position domain," in *Industrial Electronics (ISIE), 2012 IEEE International Symposium on*, 2012, pp. 1297–1302.
- [10] I. D. Landau and G. Zito, *Digital Control Systems: Design, Identification and Implementation*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [11] R. P. Areny, *Adquisición y distribución de señales*. Marcombo, 1993.

• **Segundo Congreso Internacional
sobre Tecnologías Avanzadas
de Mecatrónica, Diseño y
Manufactura (AMDM 2014),**
editado por la Universidad Central,
fue compuesto en caracteres Times
New Roman, Century Gothic, ITC
Benguiat Gothic, Helvética Lt Std.
Se publicó en Bogotá, Colombia.

Tecnologías Avanzadas de Mecatrónica, Diseño y Manufactura

Segundo Congreso Internacional AMDM 2014

El Segundo Congreso Internacional sobre Tecnologías Avanzadas en Mecatrónica, Diseño y Manufactura (AMDM 2014) fue un encuentro organizado por la Universidad Central con el apoyo de la Universidad Tecnológica de Pereira, la Universidad Militar Nueva Granada, la Universidad Autónoma de Manizales, la Universidad del Valle, la Fundación Universidad Autónoma de Colombia, el Instituto Politécnico Nacional de México, el Instituto Politécnico de Cataluña y la Universidad de los Andes. Asimismo, contó con el apoyo de Aciem y de las empresas All Robotics y Microscopios y Equipos Especiales S. A. S.

El evento se celebró del 22 al 24 de octubre, en Bogotá, y buscó reunir a docentes, investigadores, profesionales y estudiantes de áreas afines al diseño, la manufactura y la mecatrónica, con el fin de intercambiar conocimientos en conferencias magistrales, presentaciones y pósters.



Instituto Politécnico
Nacional-México



Apoya

