

Ingeniería Mecatrónica en México 2016

Juan Manuel Ramos Arreguín

José Emilio Vargas Soto

Saúl Tovar Arriaga



Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.



Prólogo

La Asociación Mexicana de Mecatrónica celebra con la edición del presente libro, 15 años de organizar el evento más importante de Mecatrónica a nivel Nacional. Celebramos este número con la edición de este libro, en el cual los estudiantes podrán tener acceso a información del desarrollo de proyectos de mecatrónica, así como también tienen la oportunidad de platicar con los ponentes e intercambiar información para colaborar en un futuro.

En la actualidad, el desarrollo de temas de tesis relacionadas con mecatrónica está disminuyendo cada vez más, debido a otras opciones de titulación que resultan menos complicadas para los alumnos. En este libro, el lector va a encontrar proyectos que se han desarrollado en áreas de la educación, energías renovables, procesamiento de señales, modelación y simulación, sistemas embebidos y prototipos. Trabajos desarrollados por estudiantes de licenciatura y posgrados. Esto lo hacemos con la finalidad de orientar al estudiante a trabajar en el desarrollo de temas de tesis, para la generación de conocimiento y tecnología nacional.

Con la esperanza de que este libro rinda frutos, reciba en sus manos el esfuerzo de organizadores y de participantes, y que le sea de mucha utilidad en su desarrollo profesional.

ATENTAMENTE,
DR. JUAN MANUEL RAMOS ARREGUÍN
PRESIDENTE AMM
PROFESOR-INVESTIGADOR UAQ
FACULTAD DE INGENIERÍA



Índice

1. La co-simulación en el proceso enseñanza-aprendizaje	1
Méndez Cárdenas Alan, Gudiño Lau Jorge, Hernández Reyes Adrián, Chávez Montejano Fidel	
2. Experiencias sobre el uso y desarrollo de software en la educación en ingeniería: el caso de la Red Alfa en el sur de Sonora	16
Jiménez López Eusebio, Rodríguez Corrales Liliana, Amavizca Valdez Laura Olivia, Luna Acosta Noé, Urbalejo Contreras Arturo, Helga Karina Tolano Gutiérrez	
3. Algunas consideraciones sobre la generación e interpretación de planos de fabricación	25
Jiménez López Eusebio, Ontiveros Moroyoqui Saúl René, García Velásquez Luis Andrés, Jiménez Ruiz Diana Lourdes, Alberto Luna Bracamontes y Bojórquez Molina José Antonio	
4. Panel solar fotovoltaico: estático contra móvil	34
Cruz Balmaceda Sergio Eduardo, Gutiérrez Sánchez José Manuel, Quintana García Daniel, Urbina Acosta Miguel Adrián, José Soledad López Gonzáles, Arnulfo Ibarra Camargo	
5. Análisis del funcionamiento de la guitarra acústica para el diseño y construcción	42
Díaz Álvarez Andrea	
6. Correlación entre la señal SEMG y la dimensión fractal en movimientos de extensión/flexión	54
Correa Figueroa José Luis, Morales Sánchez Eduardo, Gonzalez Barbosa José Joel, Huerta Ruelas Jorge Adalberto, Cárdenas Pérez César	
7. Modelo cinemático inverso en velocidades de un manipulador móvil no-holónimo para la coordinación de movimientos	66
Martínez Sánchez Noé Alfredo, González Villela Víctor Javier, López Parra Marcelo, Peña Medina Erik	
8. Obtención de función de transferencia de un motor sin escobillas de corriente directa	76
Moreno Guzmán Martin, Hernández Zavala Antonio, Domínguez López Ivan	
9. Adquisición de señales mioeléctricas superficiales generadas por posiciones específicas de la mano.	82
Torres Valverde Guadalupe Araceli, Benitez Baltazar Víctor Hugo	



10. Sistema de visión para inspección de nivel, etiquetado y sellado correcto en proceso de embotellado	94
Méndez Guzmán Hugo Antonio, Carrillo Delgado Cesar Paul, Solano Ponce Jonathan Iván, Osorio Muñoz Jaime, Barajas Guardado Ruth Noemí	
11. Instrumentación y evaluación estructural del puente Río Papaloapan durante los trabajos de mantenimiento preventivo y correctivo	107
Hernández Figueroa Jorge Alberto, Quintana Rodríguez Juan Antonio, Crespo Sánchez Saúl Enrique, Gasca Zamora Héctor Miguel, Martínez Trujano Luis Álvaro	
12. Sistema mecatrónico de ajuste automático para fuente de alto voltaje en equipo de electrospinning	122
Domingo Rangel Miranda, Mario Ed Rodríguez Sánchez, Mario Ramos Montes, Miriam Rocío Estévez González	
13. Control Proporcional Integral con Anti WindUp en Motor de DC	132
Cortés Ramírez Ulises, Castañeda Espinoza Angélica	
14. Control de temperatura bajo Norma ASTM D-3039 aplicado a pruebas de tensión en materiales en equipo de pruebas biaxiales	147
Hernández Cruz Noé, Lozano Guzmán Alejandro A., Morales Sánchez Eduardo, Moreno Guzmán Martín	
15. Control difuso de velocidad y distancia de proximidad mínima de un robot móvil para usuarios con capacidades diferentes implementado en cómputo móvil	155
Sánchez Medel Luis Humberto, Juan Manuel González, Blanca Isela Sánchez Vázquez, Daniel Rodríguez Moctezuma, Miguel Ángel Solís Jiménez	
16. Desarrollo de un prototipo para impresión de biomateriales en 3D	171
Domingo Rangel Miranda, Rafael Guerra Aranda, Mario Ramos Montes, Miriam Rocío Estévez González	
17. Sistema mecatrónico para la rehabilitación y diagnóstico de lesiones de tobillo	178
Garza Vazquez Cristian Alonso, Charre Ibarra Saida Miriam, Gudiño Lau Jorge, Altamira Jaso Mauricio, Melgoza Ziga Daniel	
18. Diseño de un Dispositivo Portamaletas Ajustable para Individuos con Movimiento Restringido en Entornos Aeroportuarios	190
Benítez Morales Alejandro, López de la Cruz Alejandra Patricia, Mendoza García Mauricio Angel†	



19. Dispositivo microposicionador XYZ para aplicaciones en fibras ópticas de vidrio	204
Talavera Velázquez Dimas, Rivas Araiza Edgar Alejandro, Mota Muñoz Francisco Gustavo	
20. Brazo robótico de 3 grados de libertad asistido por visión artificial para sistemas teleoperados	215
Julio Cesar Robles, Rodrigo Oliver Delgado Arcega, Fabio A. Gómez Becerra, Gonzalo Curiel Olivares	
21. Generación de modelo dinámico de un robot paralelo diseñado mediante SolidWorks®	232
Francisco Guillermo Salas Pérez, Marco Antonio Regalado Reyes, Julio César Morales Villa, Olga Lidia Luévano Cabrales, Ricardo Pavel Parada Morado, Gadi Suresh Kumar	
22. Algoritmo que determina la trayectoria de un manipulador móvil para abrir una puerta consumiendo mínima potencia	241
Erik Peña Medina, Víctor Javier Gonzales Villela, Marcelo López Parra, Noé Alfredo Martínez Sánchez	
23. Diseño y construcción de un robot móvil tipo Rocker-Bogie con reducción de elementos motrices	256
Aguilar-Loreto O., Muñoz-Gómez J. A., Rolón-Puente F. D.	
24. Control a distancia de un dispositivo háptico	273
Gudiño Lau Jorge, Durán Fonseca Miguel, Ríos Cortes Felipe, Charre Ibarra Saida y Alcalá Rodríguez Janeth	
25. Robot paralelo de 3 GDL aplicado al diagnóstico y rehabilitación de lesiones de tobillo	284
Vázquez García Carlos Ernesto, Gudiño Lau Jorge, Charre Ibarra Saida Miriam, Castañeda Chávez Ricardo Salvador	
26. Brazo Robótico de 3 Grados de Libertad con Inteligencia Artificial	297
Bueno Ledezma Gabriel, Conejo Benitez Cesar Eduardo, Juan Barbosa Gerardo, Pérez Bailón Waldemar, Ramírez Rebollo Daniel Rodrigo	
27. Detección de la posición de articulaciones y punta del dedo y cálculo de los ángulos formados por sus falanges con Kinect V2 y Matlab	312
Benítez Baltazar Víctor Hugo, Miranda Moya Jesús Armando	
28. Implementación de habilidad de desplazamiento en el robot de servicio SerBot II sobre rampas de acceso para discapacitados	325
Pérez Segura Eva Karina, Avilés Arriaga Héctor Hugo, Hernández Mier Yahir	



- 29. Prototipo virtual de un robot móvil multi-terreno para aplicaciones de búsqueda y rescate** **337**
García García Rafael Adrian, Arias Montiel Manuel
- 30. Diseño Mecatrónico de un Robot Móvil** **352**
García Sillas Daniel, Vargas Soto José Emilio, Díaz Delgado Guillermo,
González Gutiérrez Arturo
- 31. Desarrollo de un sistema embebido para proyectos mecatrónicos basados en motores brushless** **361**
Hernández Barrón Lorena Anaid, Vargas Soto José Emilio,
Ramos Arreguín Juan Manuel, Pedraza Ortega Jesús Carlos
- 32. Propuesta didáctica para el desarrollo de interfaz gráfica hombre-máquina usando RAD para RaspBerry Pi** **371**
Chenoweth Chenoweth Ivan Rogelio, Abril García José Humberto,
Montijo Haro Fausto, Iván Dostoyewski Meza Ibarra, Alejandro García Juárez
- 33. Sistema de adquisición de datos con plataforma híbrida FPGA-ARM** **380**
Rodríguez-Ojeda J.J., Rivas-Araiza J.E., Talavera-Velázquez D.,
Toledano-Ayala M., Rivas-Araiza E.A.
- 34. Deducciones significativas de dinámica de sistemas y mecánica vectorial** **396**
Figueroa Navarro Carlos



La co-simulación en el proceso enseñanza-aprendizaje

Méndez Cárdenas Alan, Gudiño Lau Jorge, Hernández Reyes Adrián, Chávez Montejano Fidel

Facultad de Ingeniería Electromecánica, Universidad de Colima
Km. 20.5 carretera Manzanillo-Cihuatlán, Tel. 01 31 43 31 12 07
E-mail: jglau@ucol.mx

Resumen

El presente trabajo resuelve el problema de validación experimental virtual, ya que muchas Universidades del País no tienen equipo experimental para realizar su validación en físico, en este artículo se desarrolla y se diseña una plataforma experimental virtual de un robot industrial (KUKA KR-5), donde se puede implementar cualquier algoritmo de control. Además, se muestra la importancia que tiene la co-simulación en el proceso enseñanza-aprendizaje, ya que durante la co-simulación los estudiantes pueden manipular robots o cualquier otro dispositivo tal como lo realiza en la vida real, sin correr riesgo de dañar el equipo experimental real. Además, se muestra un sistema que ayuda al proceso de enseñanza-aprendizaje del estudiante como es la co-simulación, el diseño de un robot de seis grados de libertad (g.d.l.) empleando dos software's. En Solidwork permite hacer un análisis mecánico, cinemático y dinámico del manipulador; y para resolver el problema de control del robot se utiliza Matlab y SimMechanics. También se describe de forma detallada como hacer co-simulación y crear un ambiente virtual, por lo que la co-simulación ayuda al diseño de robots y al control, ya que necesitan validar los algoritmos de control en co-simulación antes de llevarlos a la validación experimental.

Palabras clave: Co-simulación, robots manipuladores, Matlab, simmechanics y enseñanza-aprendizaje.

1. Introducción

La co-simulación contribuye mucho al proceso de enseñanza-aprendizaje en el área de las ingenierías, como el diseño de robots, mecatrónica, mecánica, automatización y control de robot manipuladores.

La simulación cooperativa es más conocida como co-simulación, no es más que una metodología de simulación que permite a los componentes individuales para simular en ambientes virtuales y que se ejecutan simultáneamente, por lo que se tiene intercambio de información de manera colaborativa. [1]

Este trabajo consiste en mostrar el manejo de la co-simulación en la ingeniería, por lo que se desarrolla un software que une al menos dos programa (co-simulación) para el control de posición de un robot manipulador industrial de seis grados de libertad (g.d.l.) KUKA KR5 sixxR850. El primer paso consiste en realizar el modelo del robot en forma virtual, es decir hacer los eslabones y articulaciones en Solidwork. Después, el modelo del robot manipulador realizado en Solidwork, es importado a SimMechanics/Matlab donde se le asignan los sensores (encoders) y actuadores (motores) a cada una de las articulaciones, así como las restricciones del robot. Y como parte final se hace un control de posición para manipular el robot en Matlab/Simulink donde se hace la co-simulación. Esto ayuda al proceso de enseñanza de varias materias.[2]



2. Software

En esta sección se describe de forma detallada el software que se emplea para la co-simulación, especialmente en este trabajo.

2.1 Solidworks

Este software es un programa de diseño asistido por computadora para modelado mecánico desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corporation. El programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos como otro tipo de información necesaria para el análisis. Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD. El proceso consiste en trasvasar la idea mental del diseñador al sistema CAD, construyendo virtualmente la pieza o conjunto. [3]

2.2 Matlab

Abreviatura de Matrix LABoratory, es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M).[4]

Además, es un programa de cálculo numérico diseñado para trabajar con ecuaciones diferenciales algebraicas, ecuaciones diferenciales ordinarias, matrices, entre otros.

2.3 Simulink

Soporte para diseño Modular Usando Modelos de referencia Simulink es un entorno de diagrama de bloques para la simulación multi-dominio y diseño basado en modelos, es compatible con la simulación, generación automática de código, y prueba continua y verificación de sistemas embebidos. Simulink ofrece un editor gráfico, bibliotecas de bloques personalizables y solucionadores para el modelado y simulación de Sistemas dinámicos.

Está integrado con Matlab, lo que le permite incorporar algoritmos de Matlab en modelos y resultados de la simulación de exportación a Matlab para su posterior análisis.

Simulink, desarrollado por MathWorks, es una herramienta comercial para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos. Su interfaz principal es una herramienta gráfica de diagramas de bloques y un conjunto personalizable de bibliotecas de bloques. Simulink se utiliza ampliamente en la teoría de control y señal digital procesamiento para la simulación y el diseño.

2.3.1 SimMechanics

Este software es una herramienta que se usa para modelar y simular sistemas mecánicos de forma muy fácil y eficiente en el ambiente de Simulink/Matlab, además de poder realizar el estudio y análisis del sistema sin la necesidad de escribir complejas ecuaciones y modelos matemáticos. El estudio de los sistemas mecánicos puede ser realizado desde la interfaz gráfica de Simulink. SimMechanics permite trabajar con diagramas de bloques para simular el movimiento de sistemas mecánicos y medir el movimiento generado por la actuación mecánica. [4 y 5]

3. Diseño mecánico del robot manipulador

El diseño mecánico se desarrolló en solidwork, en este programa se realiza el diseño de un brazo robot industrial KUKA KR-5 sixx R850, de seis grados de libertad. La figura 1 muestra el robot manipulador con sus especificaciones técnicas. [7]

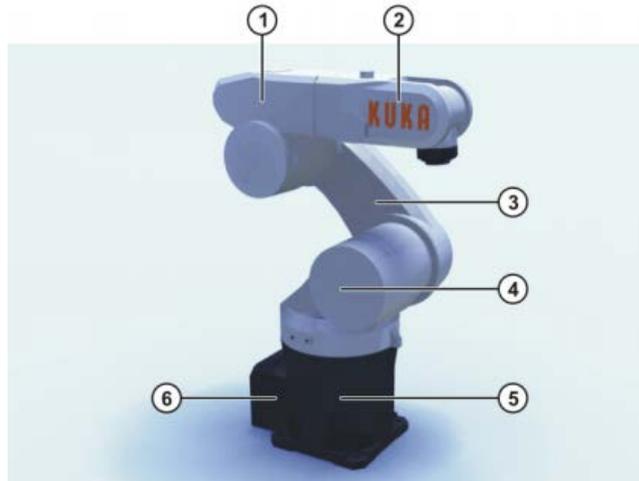


Figura 1. Parte del Robot Manipulador KUKA KR5

donde

1. Muñeca central.
2. Brazo.
3. Brazo de oscilación.
4. Columna giratoria.
5. Base del robot.
6. Instalación eléctrica.

El modelo de la KUKA se descargó en archivo CAD de la página de KUKA, sin embargo, este ensamblaje que viene es obsoleto para nuestro proyecto ya que algunas piezas vienen relacionadas solo con distancia y no están unidas entre sí físicamente, por lo cual se tuvo que modificar unas piezas para poder unirlas y ensamblarlas con relaciones de revoluta y coincidente para que al momento de exportar y simular no marque ningún error.

Por ejemplo, en la figura 2 podemos ver la articulación número 5 antes y después de ser modificada, en la parte izquierda se ve como la articulación número 5 no esta unida a la articulación 4, y al momento de simularla esta se caerá, lo cual eso se evita uniéndolo con un eje como está realmente y poniendo la relación de coincidencia en vez de una de posición.

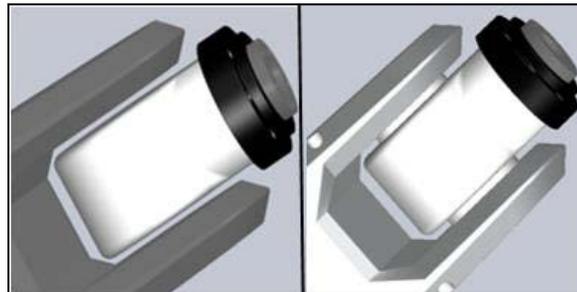


Figura 2. Comparación de la articulación 5.

Una vez terminado el ensamblaje, con relaciones de coincidencia y revoluta, se colocaron todas las articulaciones en la posición cero que tienen las articulaciones de la KUKA KR5 sixx 850 en real, debido a que SimMechanics toma como posición cero las posiciones con las que se exporta el ensamblaje.



En la figura 3 podemos observar el ensamblaje de la KUKA KR5 sixx 850 ya con las articulaciones en sus posiciones cero.

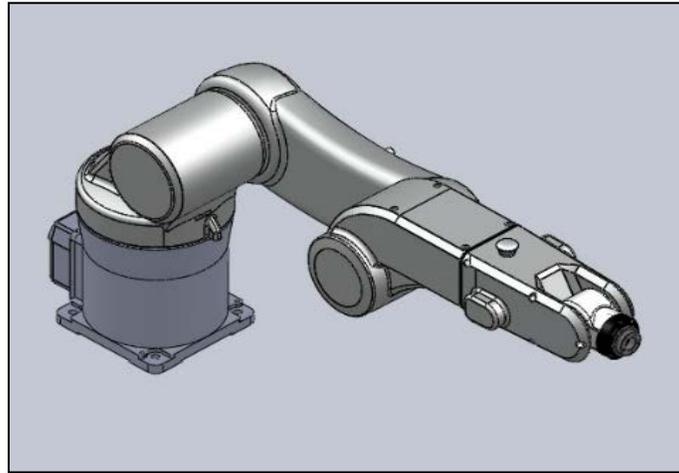


Figura 3. KUKA KR5 sixx850 en Solidworks.

3.1 Exportación a SimMechanics

Para poder exportar el modelo de Solidworks a SimMechanics, es necesario activar el complemento SimMechanics link en Solidworks, para eso tenemos que descargar la librería SimMechanics link y el archivo (install_addon.m) de la página de MatLab según la versión de MatLab que tengan como se observa en figura 4.

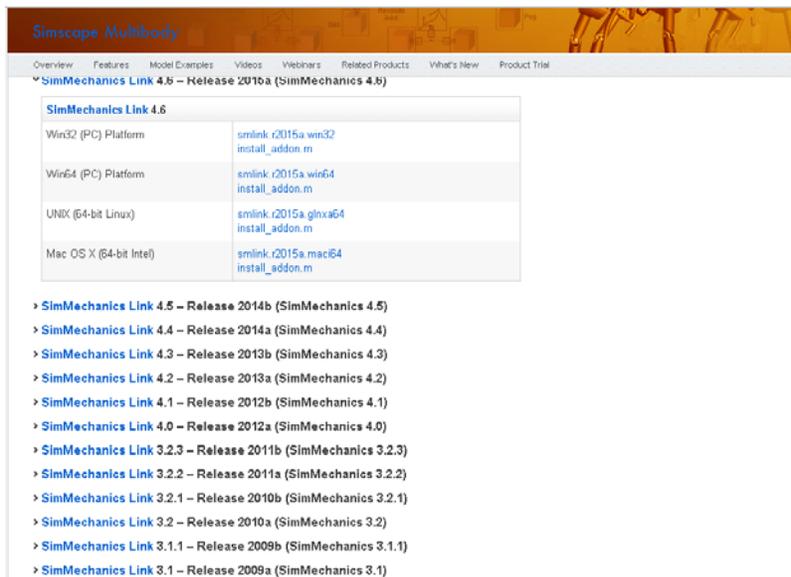


Figura 4. Descarga de Librería.

Después, se abre MatLab como administrador y ejecutamos el siguiente código, cuando se ejecuta el código tiene que tener abierta la carpeta donde se encuentra el archivo en la ventana “Current Folder” y esperamos a que se instale.



Install_addon ('smlink.r2010b.win64.zip')

Ya que la instalación se completa satisfactoriamente, se agrega el siguiente código como se muestra a continuación

```
To view documentation, type "doc smlink"
>> smlink_linksw
Registering dll: regsvr32 "C:\Program Files\MATLAB\R2010b\bin\win64\cl_sldwks2sm.dll"
```

Una vez activado, se guarda el modelo como exportación de Primera Generación que es un archivo .xml, como se muestra en la figura 5.

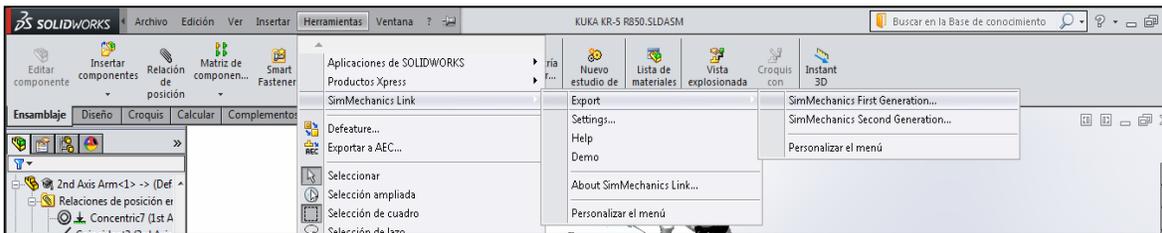


Figura 5. Exportación del modelo.

Una vez guardado, se procede a importar el archivo mediante MatLab con el siguiente código, mech_import ('KUKA KR-5 R850.xml'), lo que está entre paréntesis es el nombre con el que guardamos el modelo, para ello se tiene que abrir la carpeta en MatLab, de donde se tiene el mecanismo, después se abre el modelo mediante diagramas de bloques en Simulink, tal como se observa en la figura 6.

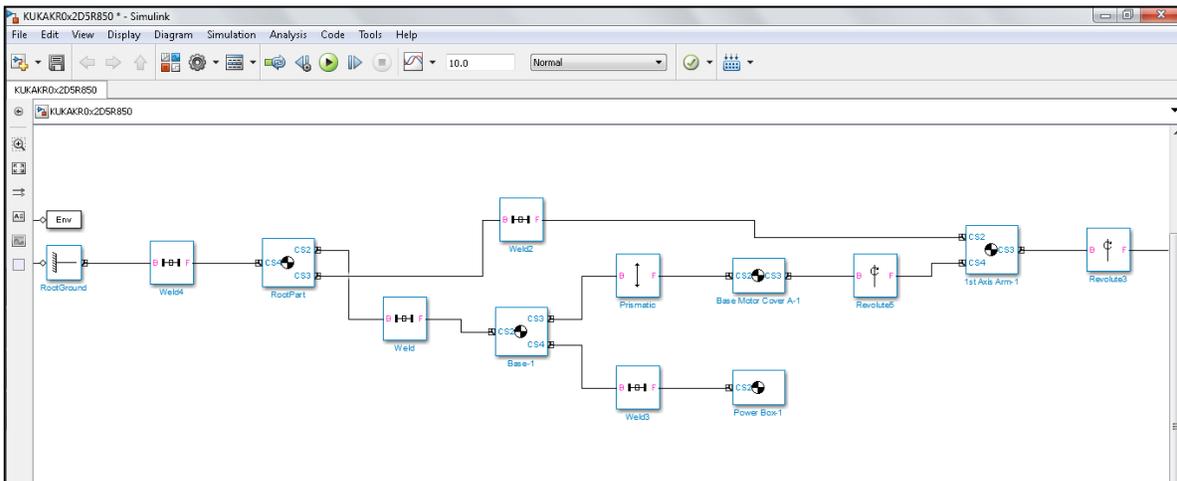


Figura 6. Diagrama de Bloques de Simulink.

Después, se simula el diagrama de bloques donde de forma gráfica se muestra, como se puede observar en la figura 7, en la que aparece el KUKA KR5 sixx850 con todos sus eslabones.

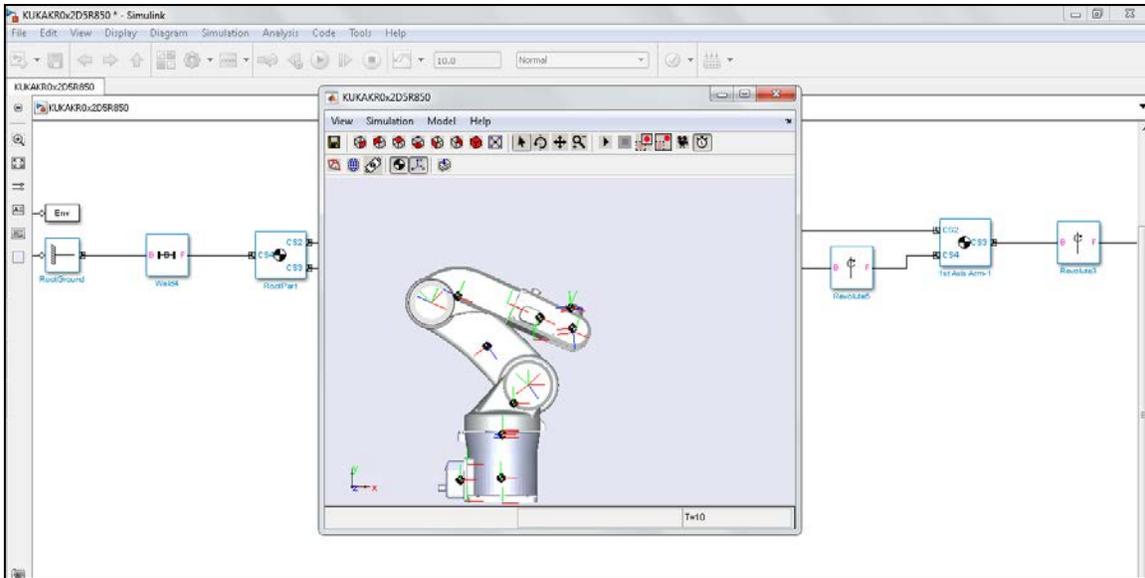


Figura 7. KUKA KR5 en simulación Simulink.

3.2 Sensores y actuadores en SimMechanics

Después de exportar el modelo del robot KUKA KR5, se inicia a declarar los sensores y actuadores. El bloque donde se coloca el sensor y el actuador es en el bloque de la revoluta, para ello se selecciona el tipo de movimiento y se le declaran el número de puertos para sensores y actuadores que en este caso serían dos, como se observa en la figura 8.

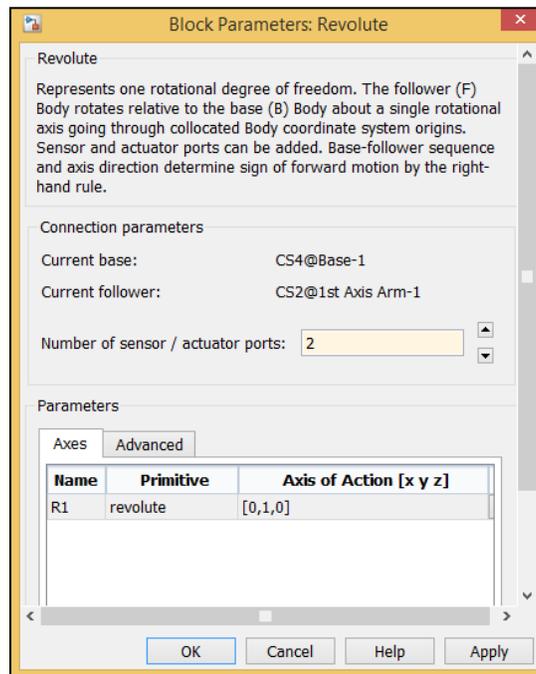


Figura 8 Declaración de actuadores y sensores.



Después, se anexo al modelo el bloque del actuador y del sensor, estos bloques se encuentran en la librería de Simulink en la sección de Simscape/ SimMechanics /First Generation, de esos bloques se añade el bloque de Joint Actuator y el Joint sensor y se conecta al bloque de la revoluta, tal como se observa en la figura 9.

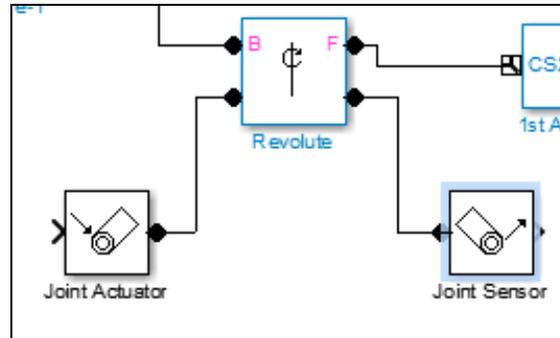


Figura 9. Bloque de actuador y sensor.

Una vez unidos, se configuran los dos bloques, al bloque del actuador se le ajustan los parámetros para que actúe con fuerzas generalizadas y que las unidades del torque sean Newton por metro, como se observa en la figura 10.

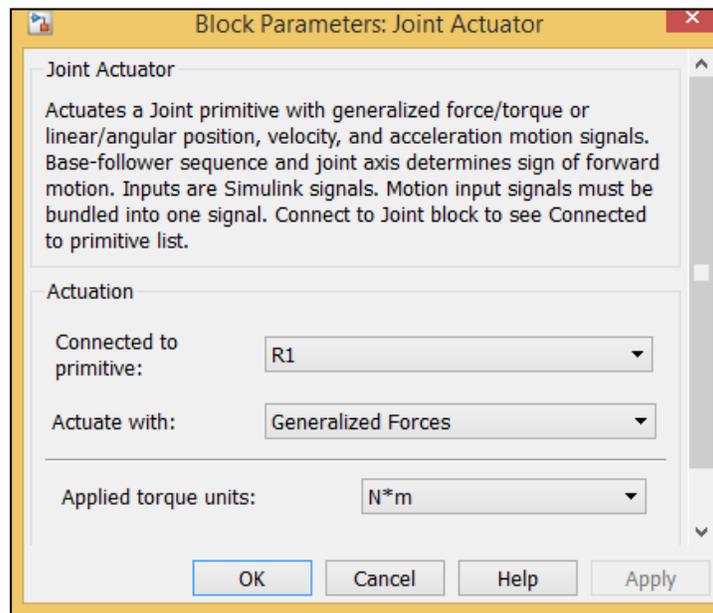


Figura 10. Bloque de parámetros del actuador.

También ajustan los parámetros al bloque del sensor, en este bloque se indica que mande la posición angular en grados y la velocidad angular en grados sobre segundo, como se observa en la figura 11.

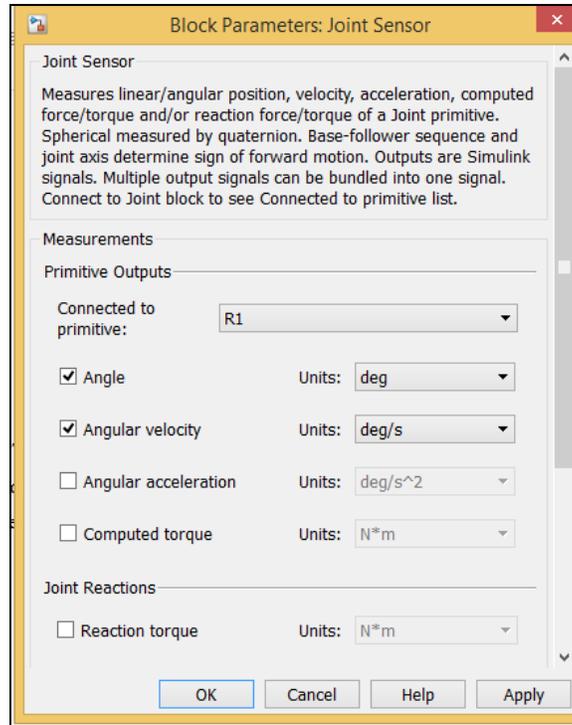


Figura 11. Bloque de parámetros del sensor.

4. Resultados experimentales de la co-simulación

El primer experimento consiste que el robot permanezca en la posición inicial (HOME), los valores son mostrados en la tabla 1, para lograr que el robot llegue a estos puntos, se emplea un controlador PD, las ganancias del controlador son mostrados en la tabla 2.[8]

Tabla 1. Valores del Primer Experimento.

Articulación	θ
1	0
2	-90
3	90
4	0
5	0
6	0

En la figura 12 se observa la co-simulación aplicada al robot KUKA KR5 sixx850, el manipulador permanece en su posición inicial (HOME) y en la figura 13 se observa la trayectoria que describe el robot en co-simulación, se muestra que llegan a las posiciones indicadas por la tabla 1.

Tabla 2. Valores de Kp y Kd.



Articulación	K_p	K_d
1	180	20
2	985	25
3	440	30
4	2.22	0.025
5	4.45	0.075
6	0.015	0.001

En la figura 14 se muestran los errores angulares de la tres primeras articulaciones, en la primera articulación el error es cero, sin embargo en la articulación 2 y 3 se tienen errores muy pequeños por los efectos de la gravedad. Los errores angulares de las últimas tres articulaciones son mostradas en la figura 15, los errores angulares de la cuarta y quinta articulación son pequeños por los efectos de gravedad, y la sexta articulación es casi cero, ya que no tiene efectos de gravedad.

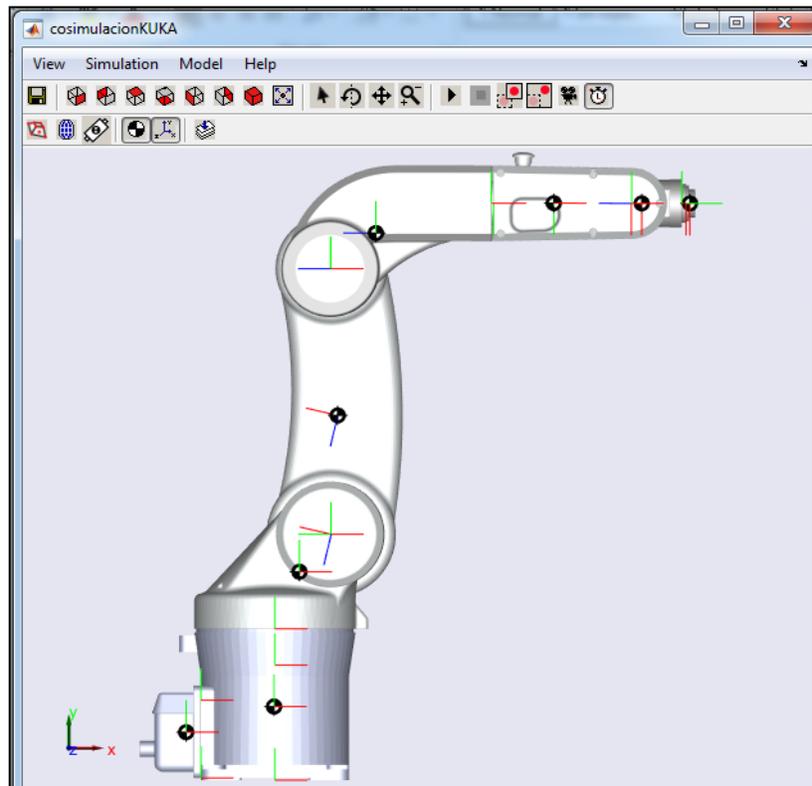


Figura 12. Primer experimento, posición inicial

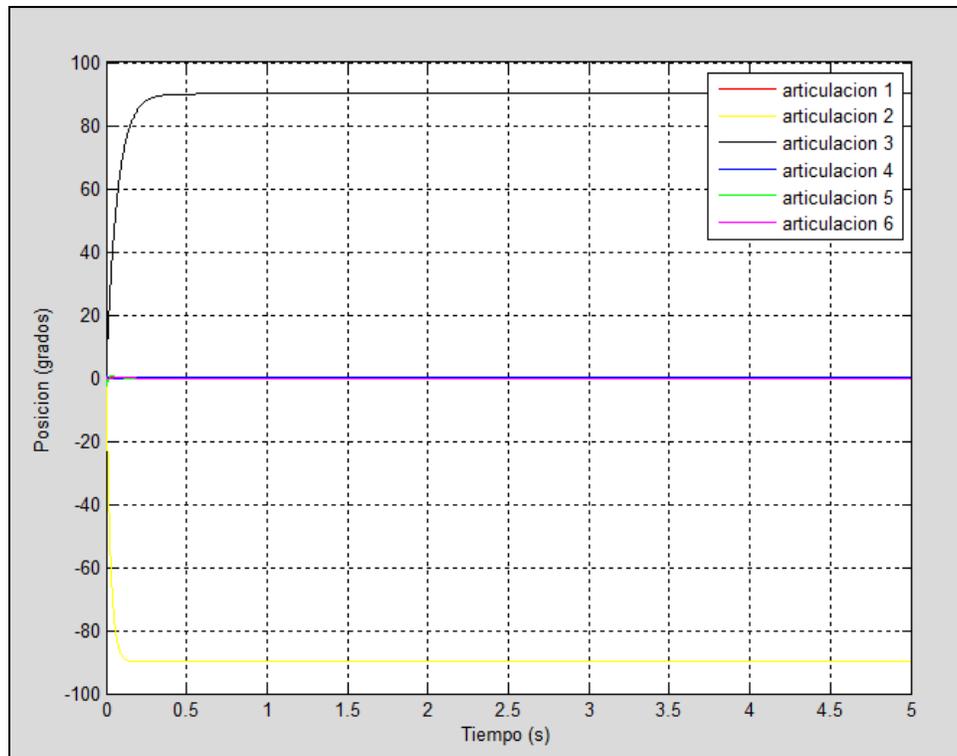


Figura 13. Posición real por articulación

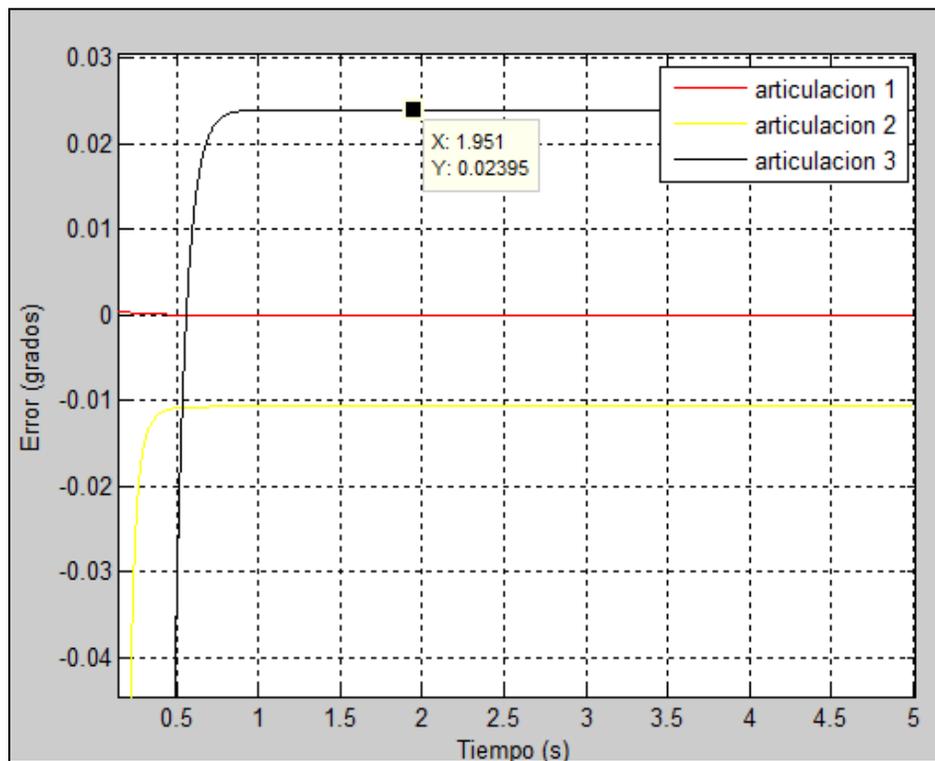


Figura 14. Error de las tres primeras articulaciones

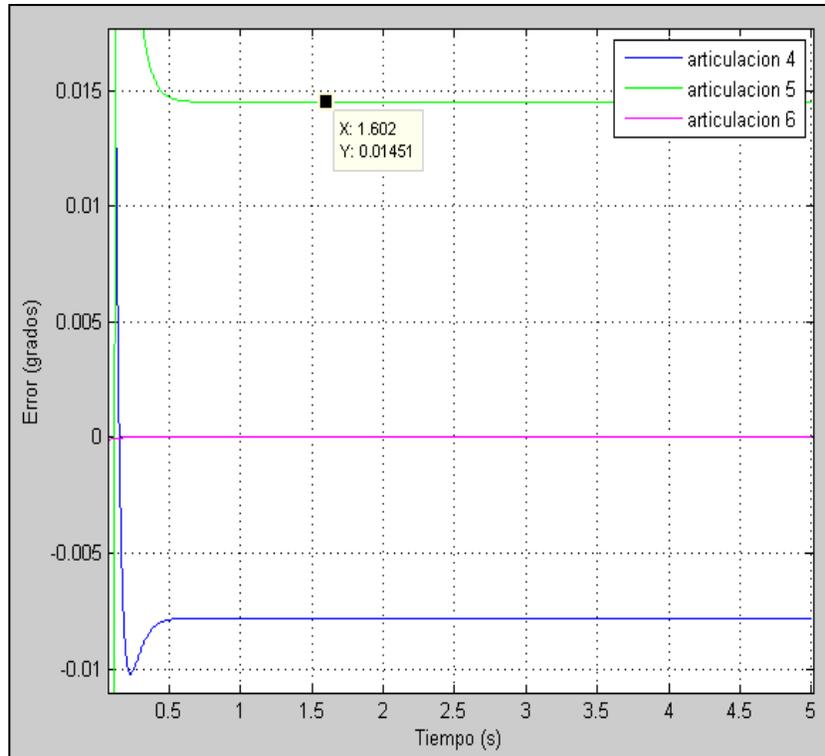


Figura 15. Error de las últimas tres articulaciones

Para continuar con la validación de la co-simulación, se realiza un segundo experimento que consiste llevar el robot manipulador a una segunda posición, las posiciones angulares deseadas para cada articulación son mostradas en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores del segundo experimento

Articulación	θ
1	-90
2	-70
3	-50
4	70
5	-80
6	-40

En la figura 16 se observa en co-simulación que el robot manipulador tiende a la posición deseada, sin embargo no se aprecia bien estas posiciones, para ello se grafica las posiciones reales de la co-simulación, y son mostradas en la figura 17.

En la figura 18 se muestran los errores angulares de la tres primeras articulaciones, en la tercera articulación es la que tiene un error de 0.02 grados, esto se debe principalmente a los efectos de la gravedad. Los errores angulares de las últimas tres articulaciones son mostradas en la figura 19, los errores angulares de la cuarta y quinta articulación son pequeños (menor de 0.02 grados) por los efectos de gravedad, y la sexta articulación es casi cero, ya que no tiene efectos de gravedad.



Con los experimentos realizados, se puede validar que el sistema virtual diseñado funciona correctamente. En este mismo sentido, se puede decir que la co-simulación esta lista, para que los estudiantes mejoren el proceso de enseñanza, ya que no solo queda en teoría sino que se puede simular y llevarlo a la validación experimental.

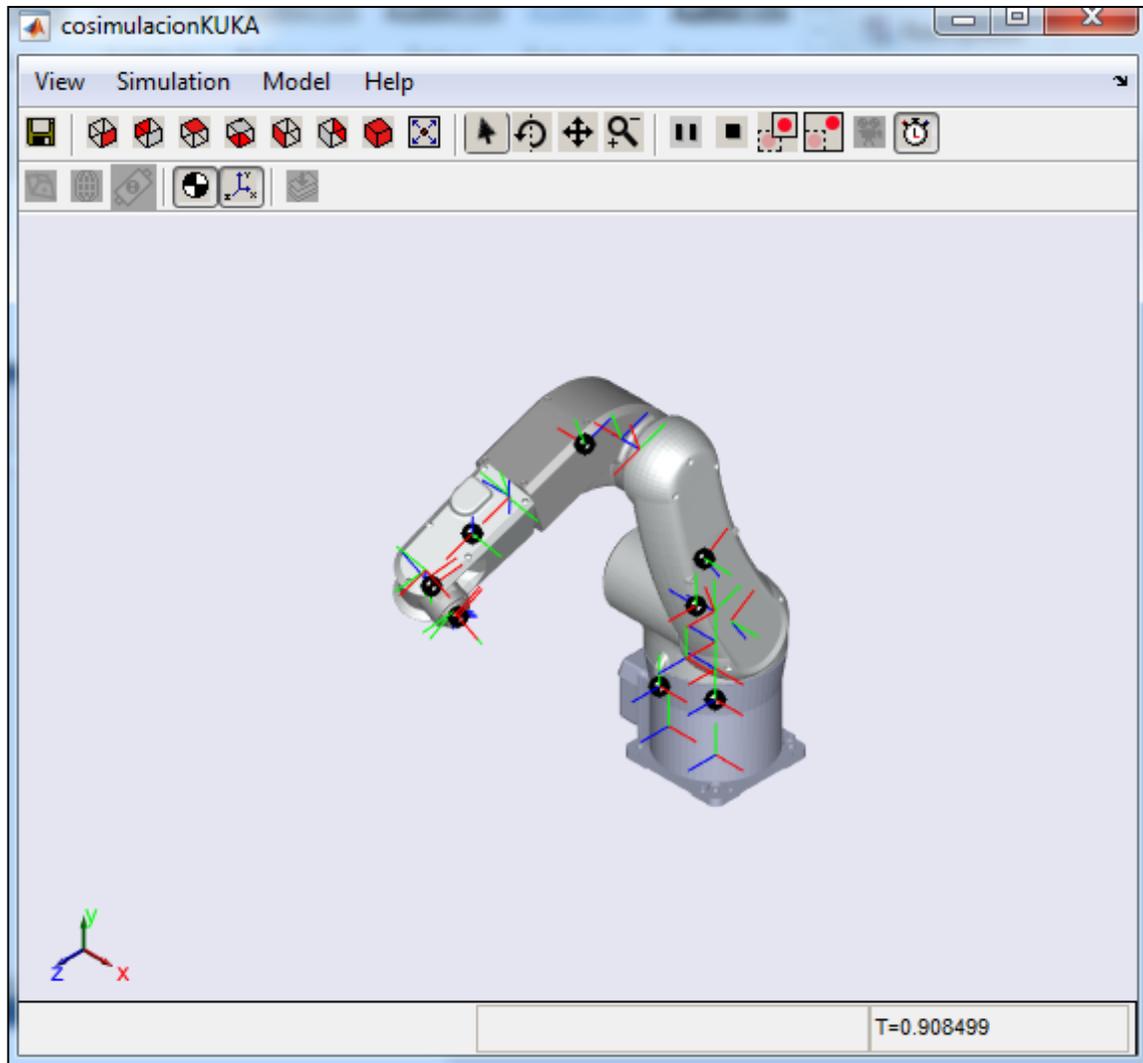


Figura 16. Segunda co-simulación posición inicial

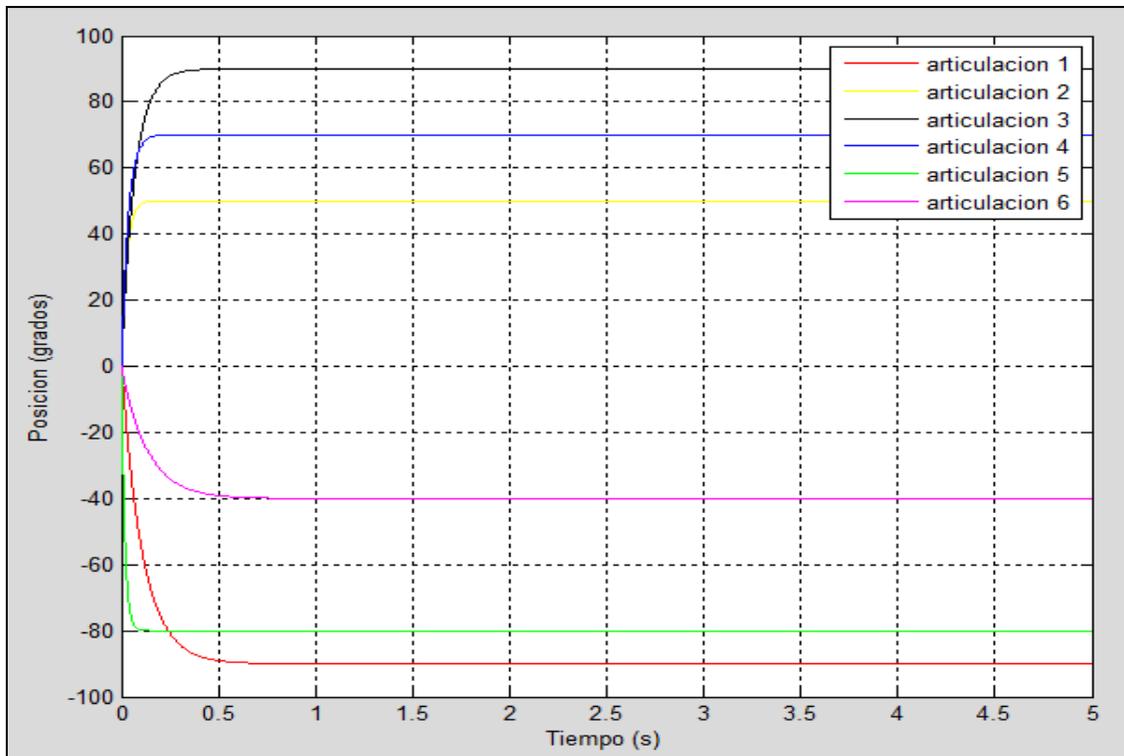


Figura 17. Posición real por articulación

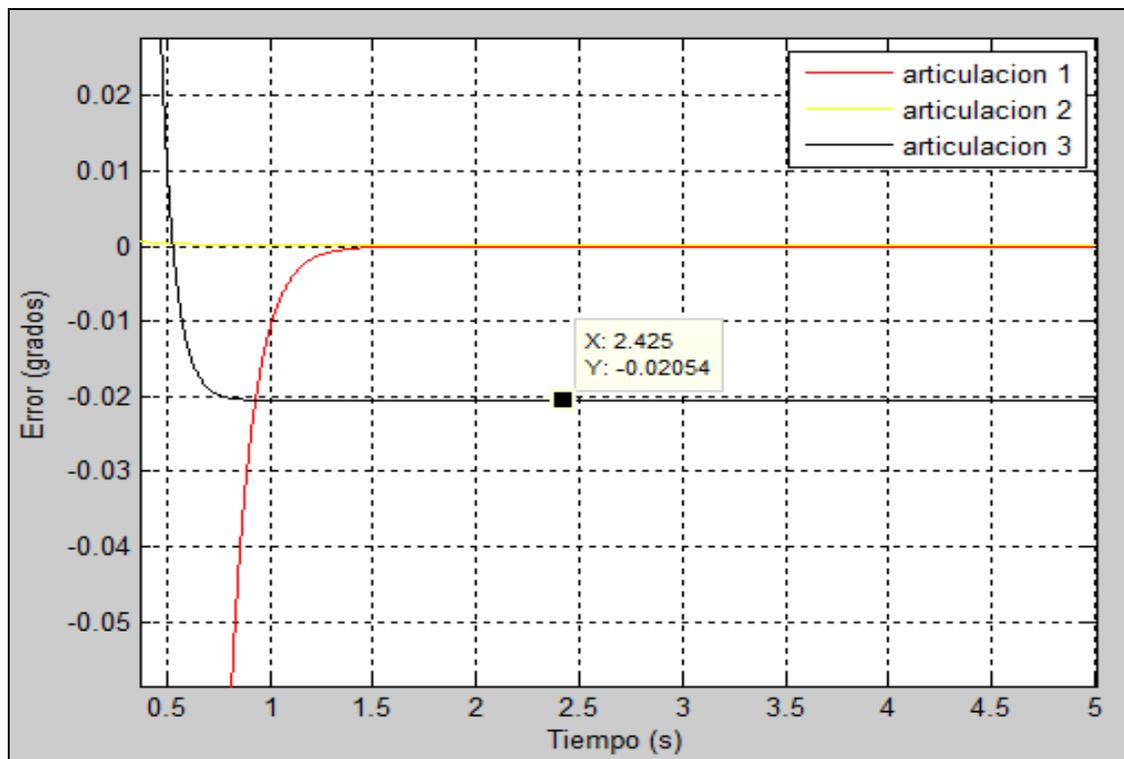


Figura 18. Error de las Tres Primeras Articulaciones

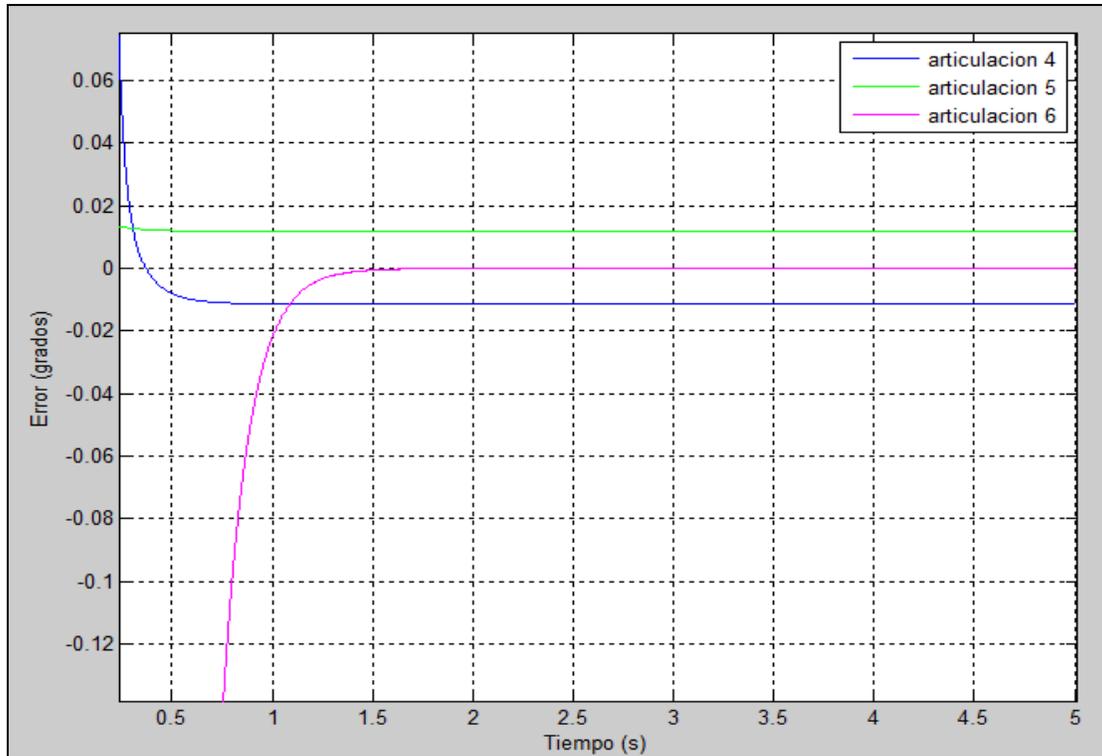


Figura 19. Error de las últimas tres articulaciones

5. Conclusiones

Este trabajo muestra cómo mejorar el aprendizaje del estudiante de las áreas de mecatrónica, robótica, mecánica, dinámica, matemáticas y control, de forma muy sencilla utilizando la co-simulación, lo que permite al estudiante aprender sin dañar equipos experimentales

Para validar que la co-simulación funciona correctamente, se realizan dos experimentos en ambos casos los resultados son satisfactorios, para lograr que el robot se mueva a los puntos deseados se utiliza un control clásico PD. Por lo que se concluye que se diseña una herramienta como es la co-simulación para el proceso de enseñanza aprendizaje de las ingenierías.

Además, se describe el diseño de un robot virtual a través de la co-simulación entre dos software SolidWork y Matlab, en el primer software se diseña el modelo completo del robot a medidas reales otorgadas por KUKA, y en el segundo (Matlab) se utiliza para importar el modelo del robot y se hace toda la parte virtual del robot, es decir se asignan los sensores y actuadores.

Referencias

- [1] Lugo, E., Ponce, P., Molina, A. y Castro, S. "Co-simulación del diseño biomecánico para un exoesqueleto robótico del miembro inferior". Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica. Vol 35, No. 2. 2014.
- [2] Estrada Álvarez, J., Arias Gil, V., Jaramillo Zapata, J. y López Ríos, S. "Modelación y simulación computacional en la enseñanza de las ciencias". Congreso de Investigación y Pedagógica. ISSN 2256-1951. 2013.
- [3] López, J. J. Fernández y Del Castillo Rodríguez, F. D. "Manual de Prácticas de CAD Utilizando el Programa SolidWorks 2014", UNAM. 2014



- [4] Ataurima Arellano, Miguel. "MatLab & Simulink para Ingeniería". MathWorks. 2014
- [5] Pratap, Rudra. "Getting Started with MatLab 2009", Department of Engineering Indian Institute of science, Bangalore New York, Oxford University Press. 2010.
- [6] Martínez A. G. M., Jáquez O. S. A., Rivera M. J. y Sandoval R. R. "Diseño propio y Construcción de un Brazo Robótico de 5gdl. RIEE&C, Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación, Vol. 4 No. 1, Pag 9-15. 2008.
- [7] Fu, K.S.; González, R.C. y Lee, C.S.G. Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence. McGraw-Hill. 1987.
- [8] Ogata, Katsuhiko, "Ingeniería de Control Moderno", Cuarta Edición. Editorial Pearson & Prentice Hall. 2003.



Experiencias sobre el uso y desarrollo de software en la educación en ingeniería: el caso de la Red Alfa en el sur de Sonora

Jiménez López Eusebio¹, Rodríguez Corrales Liliana², Amavizca Valdez Laura Olivia³, Luna Acosta Noé⁴, Urbalejo Contreras Arturo⁵, Helga Karina Tolano Gutiérrez⁶.

¹CIAMM de la UTS-IIMM-ULSA Noroeste, ejimenezl@msn.com

²Universidad Tecnológica de Hermosillo.

^{3,4}CIAMM de la Universidad Tecnológica del Sur de Sonora.

^{5,6}CADTIC de la Universidad Tecnológica del Sur de Sonora.

Resumen

Para fortalecer y potencializar las tareas de docencia, investigación y extensión en las universidades, es necesario conjuntar esfuerzos y compartir recursos materiales e intelectuales. Uno de los mecanismos de vinculación más eficientes entre empresas y universidades es el de las redes de colaboración interinstitucionales. En este artículo se presentan las experiencias en docencia e investigación de la Red ALFA conformada por tres instituciones de educación superior y una empresa, localizadas en el sur de Sonora, México. Las experiencias descritas se orientan al uso y desarrollo de software para la educación en ingeniería y en mecatrónica, desarrollo de objetos de aprendizaje y uso de métodos de ingeniería de software para el desarrollo de simuladores didácticos. Se describen los proyectos actuales y futuros de otras redes generadas de la Red ALFA. Este trabajo es importante para la ingeniería mecatrónica, puesto que la computación es uno de los campos primarios del conocimiento que integran a la mecatrónica a su enseñanza y a las aplicaciones.

Palabras clave: Redes de colaboración, objeto de aprendizaje, simuladores didácticos

1. Introducción

Hoy en día, nuestra sociedad se encuentra inmersa en una serie de profundos y constantes cambios que afectan todas las dimensiones de nuestra vida. Estos cambios se han caracterizado por su continuidad y en términos generales se han caracterizado por cuatro tipos de manifestaciones [1]:

- a) Una revolución científico tecnológica, que ha propiciado la constitución de tecnologías de la información y la comunicación.
- b) La tercerización de la economía, en donde se observa la reconversión de la producción pero sobre todo el auge de los servicios.
- c) El incremento y mejora constante de la base de conocimientos y la educación.
- d) La internacionalización de la vida social, económica y política.

En este sentido, las instituciones educativas como organizaciones que aprenden, proponen una serie de estrategias para incorporar las crecientes innovaciones que permitan el crecimiento y desarrollo de los sujetos que en ellas se involucran. Entre una de las múltiples estrategias posibles que se generan con el fin de crear las condiciones necesarias para dicho desarrollo, se encuentra la constitución de redes [1]. Las redes son un conjunto de individuos o sujetos interconectados entre sí



mediante patrones de comunicación, de relaciones de intercambio de información entre un conjunto de actores que tienen intereses comunes en el desarrollo o aplicación del conocimiento para un propósito específico, sea este científico, de desarrollo tecnológico o de mejoramiento de procesos productivos. Dichas interacciones presuponen la reciprocidad, entendida como la correspondencia, la bilateralidad de los flujos de comunicación entre los actores [2]. Una red de conocimiento se comprende principalmente como un conjunto de elementos tecnológicos, normativos, culturales y sociales dirigidos a facilitar la interacción de individuos interesados en ciertas áreas temáticas con el fin de socializar e incrementar el conocimiento tácito de cada participante y por ende el de las organizaciones [3]. Otra definición de redes de conocimiento se presenta en [4] y se definen como el conjunto de instituciones académicas, industriales, políticas y agentes de enlace que colaboran conjuntamente, mejorando el trabajo científico, debido a que posibilitan el libre flujo de información e impulsan las condiciones locales para la innovación. Estas redes tienden a agruparse con otras redes para formar sistemas regionales o nacionales de innovación. Como beneficios directos de la implantación de una Red de Conocimiento en la organización se tienen los siguientes [3]:

- Interactuar constructivamente.
- Intercambiar conocimiento y experiencias.
- Trabajar en equipo desde cualquier lugar a través de herramientas de Internet.
- Aprender a su propio ritmo.
- Ahorrar espacio y tiempo.
- Cuantificar los resultados del aprendizaje.
- Adquirir conocimientos y habilidades en forma rápida y eficaz.
- Acceder rápidamente al conocimiento necesario.
- Ser efectivos y competitivos.
- Resolver problemas conjuntamente.
- Tomar decisiones.
- Ser creativos, flexibles y adaptables.
- Aprender en el hacer.
- Generar posturas y participar en el diseño de políticas públicas.
- Estar informados, entre otras cosas

En este contexto, en el año de 2005 se formó una red de colaboración institucional denominada ALFA en el sur de Sonora, México, conformada por la Universidad La Salle Noroeste, la Universidad Tecnológica del Sur de Sonora, el Instituto Tecnológico Superior de Cajeme y la empresa Innovación en Ingeniería de Manufactura y Mantenimiento S. de R.L. MI [5]. La red ha permitido que las instituciones que la conforman participen en diversos proyectos de docencia, vinculación y extensión, entre los que destacan el uso de las Tecnologías de la Información para fortalecer la enseñanza de la ingeniería. Cabe mencionar que las instituciones que integran la Red ALFA tienen programas de estudios relacionados con la ingeniería mecatrónica, en cuyas materias y proyectos se desarrollan simuladores robóticos y de sistemas mecatrónicos. En este sentido, la computación y las TICs apoyan a la ingeniería mecatrónica en la generación de sistemas y productos.

En este artículo se presentan algunas experiencias derivadas del uso y el desarrollo de software en la enseñanza de la ingeniería y la mecatrónica, así como la descripción de algunos proyectos en proceso desarrollados por las universidades que integran la red ALFA.

2. La problemática sobre el uso de las TIC'S en la enseñanza de la ingeniería en las instituciones de la Red ALFA.

Dentro de las diversas problemáticas que la Red ALFA ha analizado desde su creación a la fecha, destacan el uso limitado de las TIC en la enseñanza de la ingeniería. Algunos de los problemas se enlistan a continuación:



Los profesores que imparten clases en las ingenierías utilizan con poca frecuencia las diversas plataformas computacionales que existen para fortalecer la docencia.

- 1) La educación en ingeniería utiliza casi totalmente software comercial. Solo un porcentaje pequeño es desarrollado en las instituciones de la Red ALFA.
- 2) La enseñanza de las matemáticas en la educación en ingeniería no hace uso frecuente de herramientas computacionales.
- 3) No se le da continuidad a los proyectos y se pierden aportaciones valiosas de los productos de las diferentes materias que se imparten en la carrera de TIC y áreas afines.
- 4) En lo que respecta a las carreras de ingeniería que no son de TIC, los proyectos de clase o de investigación que requieren del desarrollo o aplicación de software no son correctamente documentados y no se utilizan métodos o procedimientos guiados por metodologías de ingeniería de software.

Como parte de las acciones que se han llevado a cabo para darle solución a los problemas descritos anteriormente, se han desarrollado diversos proyectos en cada universidad que integra la Red ALFA. Algunos de estos proyectos se describen a continuación.

3. Experiencias en el uso y desarrollo de software en la educación en ingeniería.

El uso de software comercial y libre en educación en ingeniería, es de suma importancia, pues muchas aplicaciones en la docencia, la investigación y en las industrias requieren de la computadora y el software. A continuación se describirán algunos proyectos relacionados con el uso de la ingeniería de software para el desarrollo de simuladores para la enseñanza de la física, desarrollo de software para la enseñanza de las matemáticas y aplicación de software de cálculo simbólico para el desarrollo de simuladores para la investigación en la robótica.

3.1 Desarrollo de simuladores para la enseñanza de la física

La enseñanza de la física, al igual que la enseñanza de las matemáticas, requiere del desarrollo de simuladores que permitan probar los modelos asociados a diversas problemáticas que los alumnos enfrentan en salones de clases. Para probar los modelos derivados de la cinemática de la partícula, en la Universidad La Salle Noroeste se desarrolló un simulador de trayectorias [6] y en el Instituto Tecnológico Superior de Cajeme fue generado un simulador relacionado con el movimiento de un péndulo balístico [7]. La documentación y la sistematización del proceso de desarrollo de los simuladores se llevó a cabo utilizando un método de ingeniería de software, en este caso el Modelo Evolutivo Incremental. Para el caso del simulador de la trayectoria, se utilizó MATLAB como plataforma de programación y para el simulador del péndulo balístico se usó el software LABVIEW. La Figura 1 muestra la pantalla principal del simulador de trayectorias y la Figura 2 muestra un diagrama de casos de usos relacionado con la documentación de dicho simulador.

La Figura 3 muestra la pantalla principal del simulador del péndulo balístico y la Figura 4 muestra un diagrama de secuencia de la estructura de un incremento.

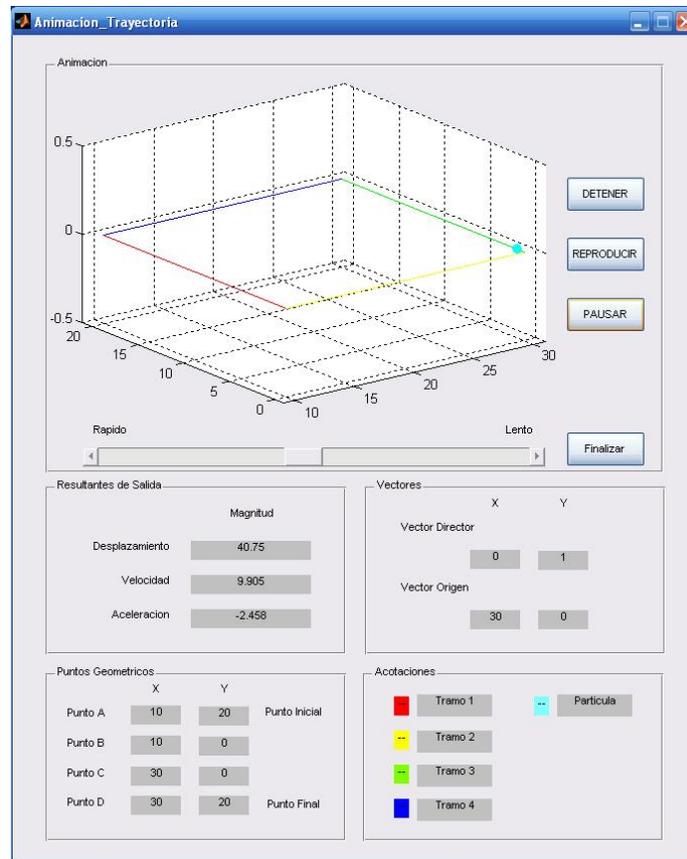


Figura. 1. Pantalla principal de un simulador de trayectoria para la enseñanza de la física

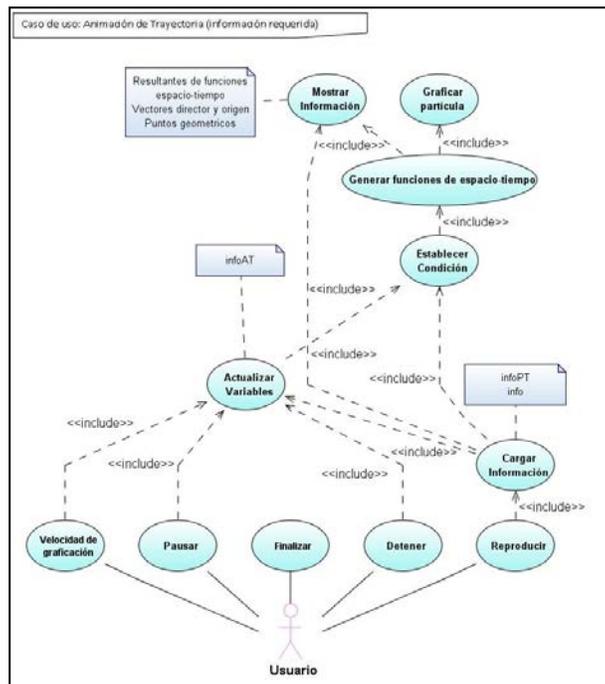


Figura 2. Diagrama de casos de usos para documentación del simulador de trayectorias

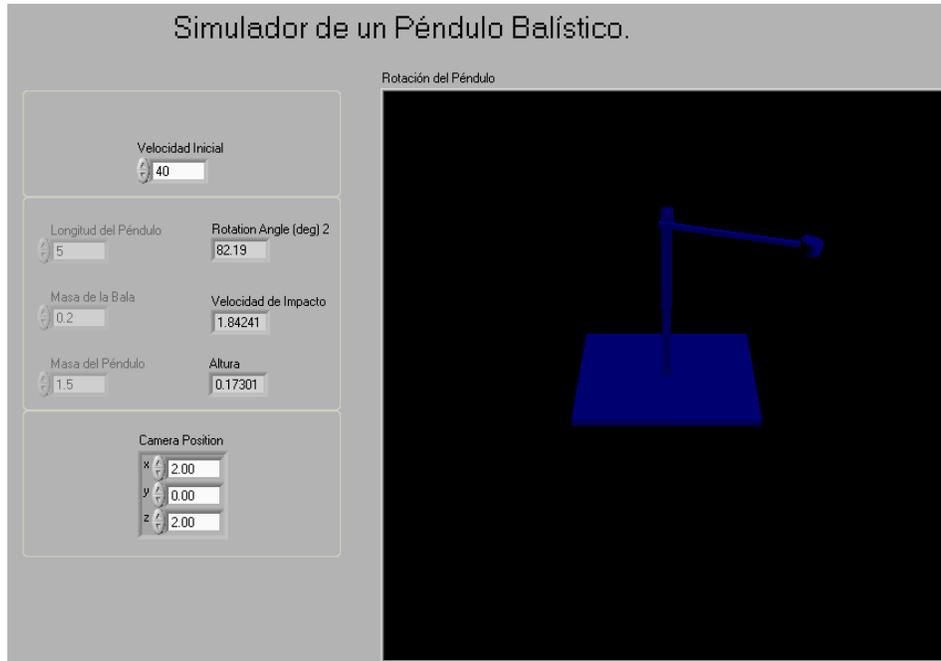


Figura 3. Pantalla principal del simulador del péndulo balístico desarrollado en LABVIEW.

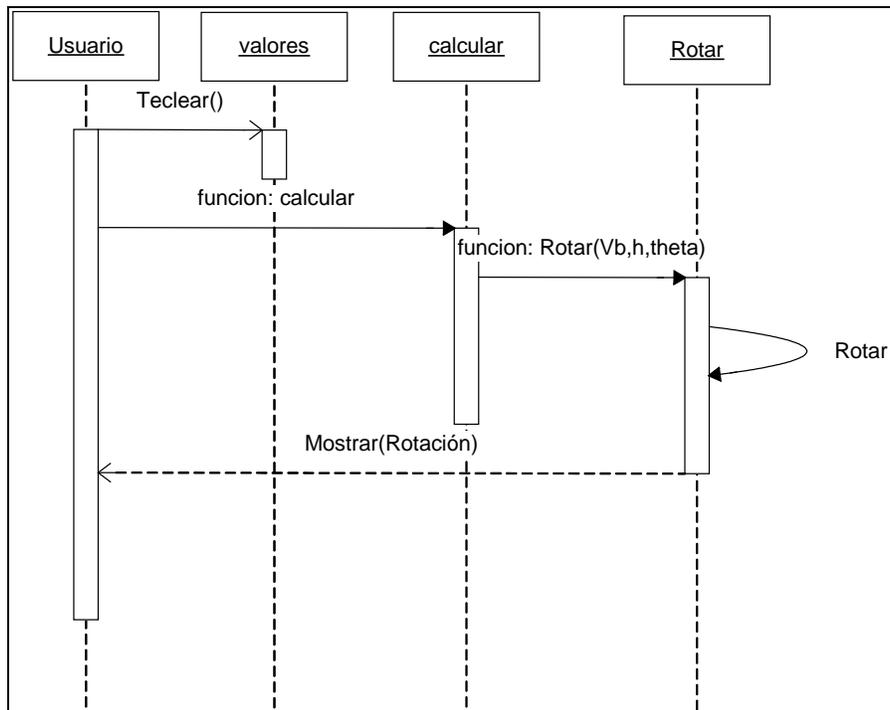


Figura. 4. Diagrama de secuencia de un incremento del péndulo balístico.



3.2 Desarrollo de un software para la enseñanza de las matemáticas

La enseñanza de las matemáticas es un problema que enfrentan la mayoría de las escuelas y universidades del mundo y, en particular, en las instituciones que conforman la red ALFA. Dentro de los proyectos que se han desarrollado para auxiliar a los profesores y alumnos en la enseñanza de las matemáticas destacan por un lado, la creación de un software por medio del cual se pueden construir funciones [8] y, por otro lado, el desarrollo de un Objeto de Aprendizaje (OA) que se utiliza para detonar el conocimiento previo de las funciones [9].

El software fue desarrollado en .ASP por alumnos de la carrera de TIC de la Universidad Tecnológica del Sur de Sonora, mientras que el Objeto de Aprendizaje fue generado por alumnos de Multimedia de la Universidad La Salle Noroeste. Este recurso digital presenta una secuencia de conocimientos previos y, para validar lo aprendido, se integra al OA el software para generar y validar funciones. El OA fue desarrollado utilizando herramientas multimedia actualizadas tales como Adobe Photoshop, Adobe Fireworks, Adobe Flash Professional, Microsoft Visual Studio 2010.

El software desarrollado y el objeto de aprendizaje contribuyen a mejorar el proceso de la enseñanza en los conceptos de conjunto y función. La Figura 5 muestra la pantalla principal del software para generar y validar funciones y la Figura 6 muestra la pantalla principal del OA.

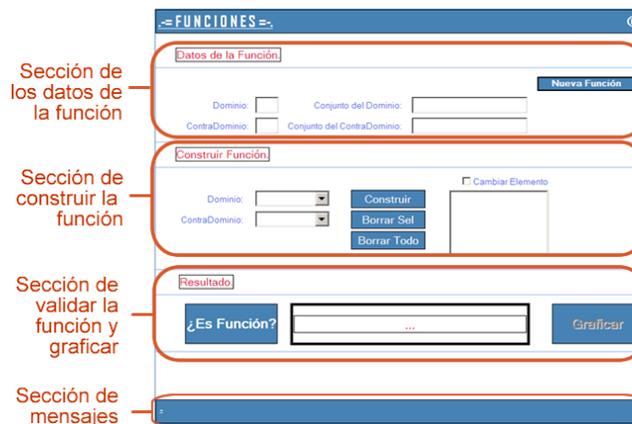


Figura 5. Pantalla principal de un software para crear y validar funciones.



Figura 6. Pantalla principal de Objeto de Aprendizaje usado para detonar el conocimiento previo de las funciones.

3.3 Aplicaciones de software de cálculo formal para desarrollo de investigación



En el contexto de la investigación en las universidades que conforman la Red ALFA, se han desarrollado simuladores de robots y mecanismos utilizando paquetes de cálculo simbólico como Mathematica y MATLAB. Estos simuladores prueban la eficiencia de herramientas matemáticas como es el caso del álgebra hipercompleja en la modelación de la cinemática de multicuerpos rígidos. El software de cálculo simbólico es útil no solo para la investigación sino también para la enseñanza de la ingeniería, pues permiten poner en práctica diversas aplicaciones en las materias de ingeniería y pueden operar en co-simulación con otros paquetes, como por ejemplo LABVIEW o SolidWorks en aplicaciones más complejas. La Figura 7 muestra un simulador desarrollado en Mathematica de un robot de dos grados de libertad que sirve para demostrar las aplicaciones de los números complejos en problemas de evasión de obstáculos en el plano [10] y la Figura 8 muestra la pantalla principal de un simulador de un robot de tres grados de libertad en donde se prueba el álgebra de Cuaterniones en la modelación de rotaciones de cuerpos rígidos espaciales [11].

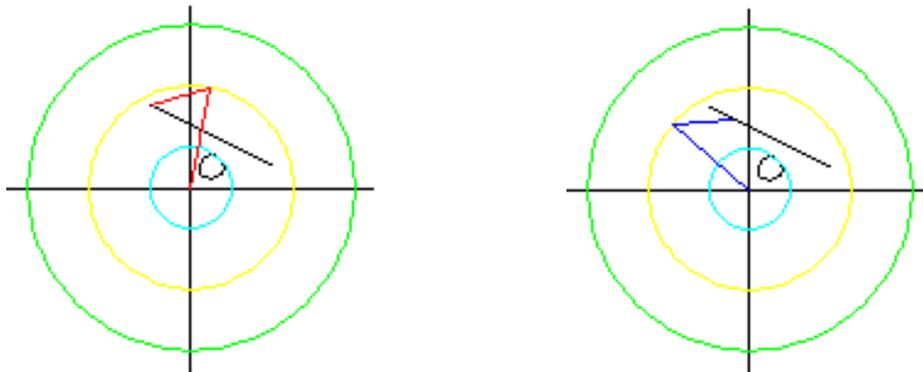


Figura 7. Pantalla principal de un simulador para evasión de obstáculos en el plano hecho en Mathematica.

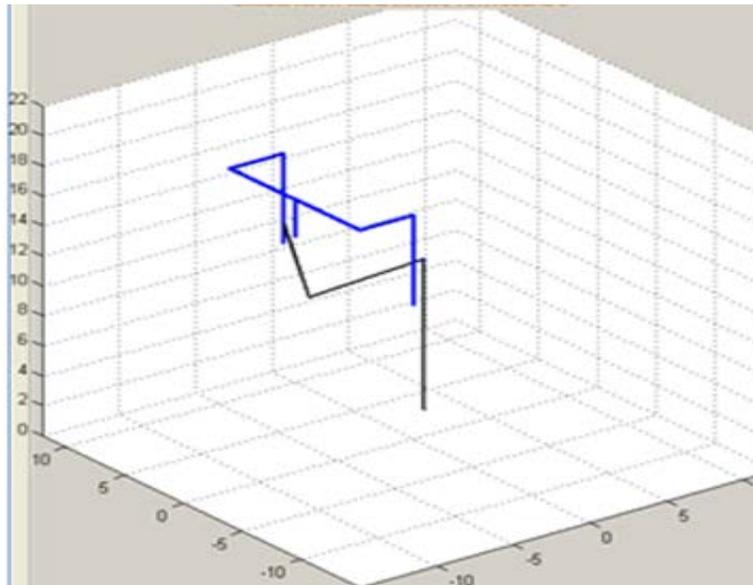


Figura 8. Pantalla principal de un simulador de un robot de 3 grados de libertad desarrollado en MATLAB

4. Otras experiencias y proyectos en proceso.



La red ALFA ha propiciado la formación de diversas redes conformadas por universidades y empresas en el sur y norte de Sonora, lo cual ha permitido la generación y compartición de experiencias docentes y el desarrollo de investigación. Una de las redes más productivas en el desarrollo de proyectos, es la Red Pyme del Noroeste, la cual está integrada por la Universidad Estatal de Sonora, el Instituto Tecnológico Superior de Puerto Peñasco y empresas y organismos empresariales. En la actualidad se está conformando una Red del Transporte entre el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) y universidades localizadas en los estados fronterizos con los Estados Unidos. Entre los proyectos relacionados con las TIC se tiene planeado hacer uso de las redes del internet 2.0 y de la Red NIBA con el propósito de formar parte de comunidades científicas y desarrollar proyectos entre universidades mexicanas y de los Estados Unidos. Al momento, la Universidad Tecnológica del Sur de Sonora cuenta ya con un convenio con el IMT y próximamente la Universidad La Salle Noroeste se incorporará a la red.

En relación con el desarrollo actual de los proyectos académicos y de investigación de las universidades que conforman a la red ALFA, se han implementado mecanismos para que los profesores y alumnos utilicen las diversas plataformas computacionales de ambiente virtual educativo como es el caso de MOODLE. En la Universidad Tecnológica del Sur de Sonora se han llevado a cabo capacitaciones y actualmente muchos profesores ya usan MOODLE. En la Universidad La Salle Noroeste se da capacitación constante en habilidades docentes a través de un diplomado de competencias lasallistas. Uno de los módulos de dicho diplomado trata precisamente del uso de la plataforma MOODLE.

5. Conclusiones

En este artículo se han descrito algunas experiencias del uso y el desarrollo de software en la educación en la ingeniería, generadas por las universidades que conforman la Red ALFA. Las principales conclusiones se resumen en los puntos siguientes:

- No existe una universidad o empresa en México que tenga o posea todos los recursos materiales e intelectuales para hacerle frente a las diversas problemáticas del mundo actual enormemente diferenciado y especializado. Se requiere formar alianzas entre empresas y universidades, y uno de los mecanismos más eficientes es la conformación de redes. La red ALFA es un ejemplo de la potencialidad que se puede lograr en el desarrollo de proyectos de docencia, investigación y docencia.
- En relación con la utilización de las TIC en la enseñanza de la ingeniería, es necesario fomentar su uso en todas sus modalidades pues a pesar de los diversos proyectos que se han desarrollado por la Red ALFA no se ha logrado masificar sus aplicaciones en la docencia y en la investigación.
- Es necesario involucrar a los alumnos a través de sus proyectos de clases o temas de tesis en el desarrollo de software y aplicaciones del mismo en proyectos industriales. El desarrollo de los simuladores para el apoyo a la enseñanza de la física permitió incorporar nuevas herramientas computacionales a los salones de clases y sobre todo usar métodos de ingeniería de software para documentar y guiar el diseño de dichos simuladores.
- Es importante generar materiales digitales como son los objetos de aprendizaje en apoyo a la enseñanza de las matemáticas, pues una mala enseñanza de las mismas trae implicaciones negativas tanto en la docencia como en las aplicaciones.
- Es necesario que las universidades incorporen redes de alta velocidad como es el caso del internet 2, para que puedan acceder a bases de datos científicas y también puedan participar en comunidades de investigación. La constitución de la red del Transporte dirigida por el IMT impulsará el uso de las redes de alta velocidad en las universidades localizadas en los estados fronterizos mexicanos y en las universidades del sur de los Estados Unidos.
- La computación en general, es una de las ramas principales que integran a la ingeniería mecatrónica, por tal motivo, es necesario desarrollar aplicaciones y productos utilizando software o bien desarrollándolo. En este trabajo se explicaron algunos proyectos



relacionados con el desarrollo de simuladores mecatrónicos y software para la enseñanza de las matemáticas.

Referencias

- [1] Obregón R., Farfán S., Emiliano P. *"Redes Académicas....Potencialidades Académicas"*. Cuarto Congreso Nacional y Tercero Internacional: Retos y Expectativas de la Universidad Autónoma de Coahuila. 2004.
- [2] Arras A. *"Comunicación organizacional"*, (3ª ed.), México, Colección Textos Universitarios, Editorial Universidad Autónoma de Chihuahua. 2010.
- [3] Prada E. *"Las redes de conocimiento y las organizaciones"*. Revista Bibliotecas y tecnologías de la información Vol. 2 No 4. 2005.
- [4] Álvarez L. *"Formación de redes de conocimiento en México: cambios impulsados por la competencia en la industria automotriz mundial. Economía y Sociedad"*, vol. XII, núm. 20, pp. 77-92. 2007.
- [5] Jiménez E., Reyes L., Galindo F., Soto E., Ochoa F. Martínez V. *"Experiencias de las relaciones industria-universidad en la región sur de Sonora, México: el caso de la RED ALFA"*. Memorias del 14 Congreso Internacional de la SOMIM, 17 a 19 de Septiembre, Puebla, México. 2008.
- [6] Longorio R., Jiménez E., Tolano K. *"Desarrollo de un simulador de trayectoria usando el modelo evolutivo con entregas incrementales"*. Congreso Nacional y X Congreso Internacional de Informática y Computación Octubre de 2010 Puerto Vallarta, Jalisco. 2010.
- [7] Rodríguez L., Jiménez E., Longorio R., Gámez C., Reyes L., Ochoa J. *"Aplicaciones de Método Evolutivo Incremental para el desarrollo de simuladores mecatrónicos: el caso del péndulo balístico."* Informe técnico ITESCA-IDDSA (IIMM)-ID-MP-05- 2008. Impulsora de Desarrollo Dinámico S.A. de C.V. ISBN 978-970-9895- 33-9. RED ALFA. 2008.
- [8] Jiménez E., Cepeda H., Tolano K., Amavizca L., Portela T., Reyes L. *"Desarrollo de un software para la generación, validación y clasificación de funciones: una contribución a la enseñanza de las matemáticas"*. IGIP Brazil 2011.
- [9] Jiménez E., Luna M., Cepeda M., Amavizca L., Tolano K., Reyes L., López S., Peraza R. *"Desarrollo de un objeto de aprendizaje para la enseñanza de las matemáticas: el caso de las funciones"*. Eleventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2013)"Innovation in Engineering, Technology and Education for Competitiveness and Prosperity". August 14 - 16, Cancun, Mexico. 2013.
- [10] Jiménez E., Reyes L., Amavizca L. *"Aplicaciones del álgebra hipercompleja al modelado de un robot de 2GDL y la evasión de obstáculos"*. CNCIIC 2012. ANIEI. UPIICSA, D.F, México. 2012.
- [11] Villa R., Hurtado J., Jiménez E., Reyes L., Pérez S., Urbalejo C. *"Modelación y simulación de un robot de 3 GDL usando Cuaterniones y MATLAB"*. 10 congreso Nacional de Mecatrónica. Puerto Vallarta Jalisco. 2011.



Algunas consideraciones sobre la generación e interpretación de planos de fabricación

Jiménez López Eusebio¹, Ontiveros Moroyoqui Saúl René², García Velásquez Luis Andrés³, Jiménez Ruiz Diana Lourdes⁴, Alberto Luna Bracamontes⁵ y Bojórquez Molina José Antonio⁶

¹Universidad La Salle Noroeste - CIAMM de la UTS-IIMM, ejimenezl@msn.com

²Universidad Tecnológica de Nogales.

^{3,4}Universidad La Salle Noroeste.

^{4,6}CADET de la Universidad Tecnológica del Sur de Sonora.

Resumen

Los planos de fabricación representan el diseño de sistemas mecánicos y mecatrónicos en términos de manufactura. La generación y la interpretación de los planos son esenciales y cruciales en la enseñanza de la ingeniería, pues de la información geométrica y no geométrica de los componentes o sistemas mecánicos dependen la fabricación, el ensamble y la validación de los prototipos, entre otros aspectos importantes del desarrollo de máquinas. En este artículo se presenta una clasificación y una propuesta sistemática para la generación de los planos de fabricación derivada del proceso del diseño de equipos originales. Además, se propone a la ingeniería inversa como método de interpretación de los planos. Se utilizan dos definiciones, una relacionada con el plano de fabricación y otra con la ingeniería inversa, para proponer los métodos de generación e interpretación de los planos. Los planos de fabricación son de vital importancia para la mecatrónica en el sentido de que representan el diseño en términos de manufactura de partes y componentes de sistemas y productos. Una buena o mala interpretación de los planos tiene implicaciones positivas o negativas en la generación de los prototipos mecatrónicos.

Palabras clave: Planos de fabricación, metodología de diseño, ingeniería inversa.

1. Introducción

La educación en ingeniería requiere de la generación de métodos y técnicas que permitan a los alumnos acceso sistemático al conocimiento y a las aplicaciones [1]. En el contexto del diseño y la manufactura de prototipos y maquinaria, es necesario que se sistematicen métodos que permitan generar e interpretar los planos de fabricación, con el propósito de que los alumnos de ingeniería puedan desarrollar prototipos y máquinas. A pesar de que la generación de los planos de fabricación está relacionada con el dibujo técnico lo cierto es que la documentación de la información geométrica y no geométrica derivada del proceso del diseño, es mucho mayor a la asociada con el dibujo técnico. Por ello, es de mucha importancia sistematizar y/o proponer métodos que permitan generar y documentar los planos de fabricación y técnicas con las cuales se puedan interpretar.

El proceso del diseño puede ser una alternativa para guiar el desarrollo de planos de fabricación, pues en cada fase del mismo existe información geométrica y no geométrica asociada con el prototipo o máquina. El proceso del diseño ha sido descrito por diversos autores [2, 3, 4] y la mayoría posee fases o pasos equivalentes. Sin embargo, la propuesta de interés en este trabajo es la presentada en [1, 5], cuyas fases son: 1) Análisis de requerimientos del cliente, 2) Diseño conceptual, 3) Cuerpo del diseño, 4) Diseño a detalle, 5) Fabricación y ensamble, 6) Pruebas y



validación, 7) Transferencia industrial, 8) Análisis del ciclo de vida e 9) Innovación tecnológica. Esta propuesta se considera de interés porque tiene más fases que las presentadas en [2,3, 4].

La interpretación de los planos de fabricación no es una tarea sencilla cuando se quiere realizar en forma sistemática, pues depende del conocimiento técnico y de la creatividad del alumno de ingeniería, así como del sentido de la aplicación. La interpretación de los planos por lo general se realiza en forma empírica y depende del conocimiento y la experiencia del ingeniero. La ingeniería inversa puede ser utilizada como procedimiento para la interpretación de los planos de fabricación [6]. Al igual que el proceso del diseño, la ingeniería inversa tiene diversas definiciones y pasos [7, 8, 9]. La definición de interés y las fases de la ingeniería inversa que serán utilizadas en este trabajo es la propuesta en [1,7] pues es general y consta de 6 fases.

Por otro lado, los planos de fabricación relacionados con la parte mecánica de partes y componentes, son esenciales en la ingeniería mecatrónica, pues la fabricación de prototipos y el desarrollo de máquinas mecatrónicas dependen de la generación correcta de los planos y de su correcta interpretación. Por ello, es importante que los alumnos de ingeniería mecatrónica cuenten con metodologías que los guíen hacia el desarrollo correcto y hacia una interpretación sistemática de los planos de fabricación.

En este artículo, se utilizan las fases del proceso del diseño presentadas en [1, 5] y las fases de la ingeniería inversa desarrolladas en [1, 7], para proponer una sistematización que permita generar e interpretar planos de fabricación en beneficio de la educación en ingeniería.

2. Sobre la generación e interpretación de los planos de fabricación.

Los planos de fabricación representan quizás, los documentos más importantes del proceso del diseño, pues en ellos se encuentran las ideas sistematizadas del diseñador y la información geométrica y de manufactura de las partes y los productos. Los planos de fabricación representan por un lado, la documentación de las tecnologías (de productos) y, por otro lado, al diseño en términos de manufactura. El plano de fabricación se puede considerar como una de las representaciones del diseño cuya finalidad es hacer realidad la idea concebida, analizada y probada intelectualmente. Por ello, los planos de fabricación son quizás las representaciones más especializadas del proceso del diseño, pues para su desarrollo, se requieren las más altas consideraciones del diseño combinadas con consideraciones de manufactura, puesto que no puede haber diseño sin consideraciones manufactura [6]. Una definición formal de plano de fabricación es la presentada en [10]:

Un plano de fabricación es una representación esquemática física o digital del diseño de una parte o un conjunto de partes que pueden estar interrelacionadas entre sí, en términos de manufactura. Dicha representación contiene información geométrica y no geométrica de las partes y componentes, además, debe cumplir con las siguientes consideraciones:

- 1) La información geométrica y no geométrica (de manufactura, costos, etc), debe ser clara y lo más explícita posible.
- 2) La información debe ser objetiva (Esencialidad, grado de importancia de la información, otros).
- 3) La información debe estar completa, finita y bien definida.
- 4) La información debe estar normada.
- 5) La información debe estar libre de vaguedades y ambigüedades.

Esta definición impone una severa restricción a todas aquellas formas de representación del diseño en términos de manufactura, pues exige cinco restricciones fundamentales en relación con la información geométrica y no geométrica que representan. Los planos de fabricación pueden ser considerados como una colección de primitivas de manufactura [11], considerado que una primitiva de manufactura es una representación computacional que combina información geométrica y no



geométrica la cual tiene algún significado para el proceso del diseño y/o para otras aplicaciones [12]. Los planos de fabricación tienen dos problemáticas: 1) La generación y 2) La interpretación [6].

2.1 El problema de la generación de planos fabricación.

Considérese el siguiente problema:

Dada una necesidad, idea extendida o requerimiento tecnológico, encuentre un conjunto de representaciones esquemáticas o modelos técnicos relacionados con el diseño y la fabricación del producto, máquina o sistema (soluciones de la necesidad), tal que se satisfagan las consideraciones siguientes:

- La representación puede ser física o digital.
- La representación debe ser funcional (útiles para diversos propósitos en el sentido de las fases del diseño).

Las representaciones deben integrar cuando menos información de diseño y/o manufactura. Si la representación es producto de cuando menos la fase del cuerpo del diseño, debe cumplir con los requerimientos siguientes:

- 1) La información geométrica y no geométrica (de manufactura, costos, etc), debe ser clara y lo más explícita posible.
- 2) La información debe ser objetiva.
- 3) La información de ser completa, finita y debe estar bien definida.
- 4) La información debe ser normada.
- 5) La información debe estar libre de vaguedades y ambigüedades.

2.2 El problema de la interpretación de planos fabricación.

Considérese el problema siguiente:

Dado un conjunto de planos de fabricación (originados durante todo el proceso del diseño) y una naturaleza de aplicación, encuentre: un conjunto de modelos de información tales que:

- 1) Los modelos sean funcionales y representativos, según la naturaleza de aplicación.
- 2) La información debe ser clara y específica.
- 3) La información debe informar cuando menos las características geométricas, dimensionales y de fabricación de los componentes representados en los planos.

3. La metodología del diseño y la generación de los planos de fabricación.

Como se ha mencionado en la sección anterior, el problema de la generación de planos de fabricación consiste en obtener información geométrica y no geométrica de los diseños de partes, componentes o máquinas. Todo el proceso de elaboración de planos de fabricación se genera desde el mismo momento en que se presenta una necesidad hasta que el producto cumple con su ciclo de vida. En todo ese proceso los planos de fabricación se van reformando, actualizando y complementando. Los planos de fabricación pueden clasificarse de la manera siguiente [6]:

- 1) Representaciones primarias de la idea: bosquejos, ideas escritas y representaciones no formales.
- 2) Representaciones de la idea de la primera formalización: bosquejos semi-dimensionales y representaciones semi-formales.
- 3) Representaciones de la segunda formalización: Representaciones del cuerpo del diseño: Hojas de cálculo, planos semi-formales y planos formales.
- 4) Representaciones del prototipo: planos reconfigurados, planos finales



- 5) Representaciones de la máquina transferida: Planos finales, planos de mantenimientos y/o planos de ensamble.
- 6) Representaciones de actualización de la tecnología: planos mejorados.
- 7) Representaciones de la innovación: Planos con cambios mayores.

La clasificación de planos descrita anteriormente se relaciona con el proceso del diseño descrito en [1] y está relacionada con la generación de planos de fabricación.

Una propuesta para la generación de planos de fabricación es aquella en donde los planos acompañan el proceso del diseño, es decir, desde los esquemas básicos de dibujo desarrollados, por ejemplo, para una cotización hasta el último plano del ciclo de vida del producto, esto es, hasta antes de la innovación tecnológica. Aunque los planos de fabricación van mejorándose continuamente, es hasta la fase de innovación tecnológica en donde los cambios son ya mayores. Por lo tanto, es posible dividir el proceso del diseño en las fases siguientes:

- 1) Fase 1: Desarrollo no formal de la idea.
- 2) Fase 2: Desarrollo formal de la idea.
- 3) Fase 3: Mejoramiento mayor.

Estas fases se subdividen en:

- 1) Fase 1): Análisis de los requerimientos del cliente,
- 2) Fase 2): Diseño conceptual, cuerpo del diseño, diseño a detalle, fabricación y ensamble, pruebas y validación, transferencia industrial, análisis del ciclo de vida de producto.
- 3) Fase 3): Innovación tecnológica.

Otra forma de concebir las fases es la siguiente:

- 1) Fase 1: Creación de la idea del producto.
- 2) Fase 2: Formalización de la idea del producto.
- 3) Fase 3: Cambios radicales del producto.

Esta clasificación es útil puesto que permite entonces clasificar todo el proceso de desarrollo de los planos de fabricación que acompañan el desarrollo completo de un producto. Es posible asociar la clasificación de planos anteriormente con cada una de las fases del proceso de diseño.

La Tabla 3.1 ofrece un camino o una guía para la generación de los planos de fabricación, pues describe una secuencia para la generación de esquemas del diseño y del producto. Una guía o método que ayude a la generación de planos de fabricación relacionada con las fases del diseño de equipos originales es la siguiente:

- 1) Desarrollar esquemas o bocetos de la idea del diseño o producto ya sea en papel o en sistemas de cómputo.
- 2) Desarrollar esquemas o bocetos utilizando información más completa y representativa de diseños, formas gráficas y materiales del producto.
- 3) Desarrollar todos los cálculos, representaciones, procesos y simulaciones necesarias para verificar si el diseño conceptual propuesto debe ser tomado en cuenta o no, y levantar hojas de cálculo de variables y selección de materiales.
- 4) Incorporar todos los detalles necesarios para completar el diseño faltante, introducir normas de dibujo, materiales y procesos y desarrollar formalmente los necesarios para la fabricación del prototipo.
- 5) Utilizar los planos de fabricación para fabricar y ensamblar (si es necesario) un prototipo.
- 6) Ajustar la información geométrica y no geométrica de los planos de fabricación en caso de ser necesario debido a consideraciones de fabricación o de diseño.



- 7) Realizar las pruebas, validaciones, verificaciones y calibraciones al prototipo y reajustar la información generada en los planos para transformar el prototipo en una máquina o parte transferible a la industria.
- 8) Desarrollar los planos de ensamble, de operación (en caso de una máquina) y de mantenimiento (si es una máquina).
- 9) Desarrollar un informe técnico de la transferencia que incluya todos los planos finales.
- 10) Realizar un chequeo periódico a la parte o máquina transferida para coleccionar información que permita corregir errores o consideraciones no previstas en el diseño original y realizar mejoras a los planos de fabricación, ensamble y mantenimiento.
- 11) Realizar investigaciones acerca de innovaciones en el mercado del producto y proponer cambios o mejoras profundas. Se deben generar nuevos planos.

Tabla 3.1. Los planos de fabricación durante el proceso del diseño.

Fases generales del diseño	Fases de la metodología	Tipo de plano de fabricación	Descripción	Producto o semiproducto
Fase 1	Análisis de los requerimientos del cliente	Representaciones primarias de la idea.	Ideas generales, ideas extendidas, búsqueda de propuestas, dibujo a mano alzada, representaciones computacionales de la idea, representaciones básicas del producto.	Bosquejos, ideas escritas y representaciones no formales.
Fase 2	Diseño conceptual	Representaciones de la idea de la primera formalización	Ideas maduras, modelado de sólidos, prototipos escalados, primeros cálculos, bosquejos acotados y con materiales.	Bosquejos semi-dimensionales y representaciones semi-formales.
Fase 2	Cuerpo del diseño	Representaciones de la segunda formalización	Cálculo de materiales, de variables cinemáticas, dinámicas, dimensionamientos, simulaciones, modelos en sólidos.	Hojas de cálculo y semi-planos.
Fase 2	Diseño a detalle	Representaciones de la segunda formalización	Detalle de pieza, conexiones básicas, formalización de los bosquejos, introducción de normas de dibujo y de manufactura, planos formalizados.	Planos de fabricación formales.
Fase 2	Fabricación y ensamble	Representaciones del prototipo	Fabricación de piezas y componentes según los planos y ensambles según los planos, desarrollo del primer prototipo formal.	Planos reconfigurados
Fase 2	Pruebas y validación	Representaciones del prototipo	Pruebas al prototipo, calibraciones y definición de parámetros operacionales.	Planos finales
Fase 2	Transferencia tecnológica	Representaciones de la máquina transferida	Planos de instalación, planos de mantenimiento y planos finales.	Planos finales, planos de mantenimientos y/o planos de ensamble.
Fase 2	Análisis del ciclo de vida	Representaciones de actualización de la tecnología	Mejora continua de la máquina e innovaciones pequeñas.	Planos mejorados
Fase 3	Innovación tecnológica	Representaciones de la innovación.	Cambios mayores en el diseño de la máquina, mejoras considerables o cambio radical de producto.	Planos con cambios mayores

La generación de planos de fabricación requiere de todo un proceso de construcción geométrica y de conocimiento de normas, dibujo técnico, tolerancias, procesos de fabricación y sobre



de todo de creatividad, así como de herramientas computacionales tipo CAD (Computer Aided Design). La Figura A.1 (ver apéndice A) muestra un plano de fabricación generado bajo la aplicación de la metodología de diseño.

4. Sobre la interpretación de los planos de fabricación.

La interpretación de planos de fabricación es más complicada que la generación de los mismos, pues se intenta determinar bajo observación del diseñador o bajo scanner o herramientas digitales y computacionales (digitalización de planos), información geométrica y de manufactura que ayuden a descifrar los principios de diseño, los procesos de fabricación, la operación de una máquina (si son planos de operación y mantenimiento), ensambles (si son planos de ensambles), entre otras cosas. Por ello la interpretación requiere de cuando menos tres aspectos [6]:

- 1) De la naturaleza de la aplicación de la información generada de la interpretación.
- 2) Del conocimiento esencial base para generar la interpretación que depende de la naturaleza de la aplicación.
- 3) De la creatividad del interpretador.

En relación con la naturaleza de aplicación, queda claro que no es lo mismo interpretar un plano de fabricación para aspectos de fabricación que interpretar un plano para efecto de mantenimiento, ensamble o ingeniería inversa. En cuanto al conocimiento, es importante aclarar que entre más conocimiento se tenga del área de aplicación, más se facilita la interpretación y, finalmente, la creatividad del interpretador es clave, puesto que es la parte humana que sistematiza la observación, en este caso, de los planos de fabricación.

Al igual que el proceso de creación de planos de fabricación, no existe un método único para la interpretación de los mismos, pues depende de cuando menos de los tres consideraciones descritas anteriormente. Sin embargo, siempre es más poderoso utilizar algún método sistemático (como el método científico) que aquellos generados a prueba y error o por la experiencia del diseñador. Un método sistemático que puede ayudar a la interpretación de los planos de fabricación es la ingeniería inversa. La ingeniería inversa, en especial de partes y componentes o de diseño de máquinas, tiene como objeto de estudio un parte o máquina con la finalidad de obtener un modelo o un duplicado. Es posible utilizar el mismo principio de la ingeniería inversa para interpretar planos de fabricación, considerando que el objeto de estudio o de referencia es el plano de fabricación.

4.1 Interpretación de planos de fabricación utilizando ingeniería inversa.

La ingeniería inversa es la aplicación sistemática de un proceso analítico - sintético guiado con el cual se busca determinar las características, propiedades y/o funciones de un sistema, una máquina o un producto o una parte de un componente o un subsistema. Su propósito principal es determinar cuando menos un modelo o una característica de un objeto o producto o sistema de referencia cuya información sea limitada, esté incompleta o no exista [10].

Las fases de la ingeniería inversa son [1]:

- Fase 1: Conocimiento preliminar del objeto de referencia (A).
 - Fase 2: Diseño de un plan de investigación.
 - Fase 3: Aplicación del plan al objeto de referencia.
 - Fase 4: Sintetizar la información generada por el plan, generar el modelo B y demostrar que $B \sim A$ (equivalencias entre A y B).
 - Fase 5: Caracterizar el modelo B.
 - Fase 6: Usar B para diversos propósitos.
- O, en forma explícita [1]:

- 1) Se presenta $A \in PCR$: (Objetos con Poco Contenido Referencial).



- 2) Se definen las referencias (CFR): (Conjunto Finales de Referencias)
- 3) Se definen los objetivos (COE): (Conjunto de Objetivos)
- 4) Con CFR y COE, se diseña el proceso de la investigación.
- 5) El producto del diseño del paso 4) es un plan o programa de investigación operativa (P).
- 6) Se aplica P al objeto A.
- 7) El resultado del paso 6) es información de A.
- 8) Se considera el paso 3) y con los resultados del paso 7) se genera B.
- 9) B es un modelo.
- 10) Se verifica, según el paso 3), si B es equivalente a A.
- 11) Se dan las conclusiones.
- 12) Se reevalúa B.
- 13) B es aplicable.

Para que la metodología de la ingeniería inversa pueda ser aplicada a la interpretación de planos de fabricación, es necesario redefinir algunos términos:

- El objeto de referencia A es uno o un conjunto de planos de fabricación.
- Los planos de fabricación se consideran finitos, completos y bien definidos.
- El modelo B es información geométrica y no geométrica interpretada del plano de fabricación.

La ingeniería inversa es aplicada por medio del diseño de un plan de investigación P en donde se definen una serie de procedimientos o programas que son aplicados al objeto de referencia, en este caso, al plano de fabricación que se quiere interpretar. Por ejemplo, se pueden diseñar procedimientos relacionados con:

- La información geométrica y dimensional del plano.
- La información no geométrica del plano (principalmente información de manufactura).

El número, tipo y secuencia de aplicación de los procedimientos, dependen del conocimiento y la experiencia del interpretador. Algunos ejemplos de procedimientos relacionados con la interpretación de planos de fabricación son los siguientes:

- 1) Procedimientos para caracterizar él o los materiales.
- 2) Procedimientos para interpretar la información geométrica y dimensional.
- 3) Procedimientos para interpretar las normas.
- 4) Procedimientos para interpretar las tolerancias.
- 5) Procedimientos para interpretar los procesos de fabricación.

La ingeniería inversa aplicada a la interpretación de planos de fabricación busca obtener información geométrica y no geométrica en forma ordenada y sistemática de un plano o conjuntos de planos. Por ello, la aplicación de los 13 pasos descritos anteriormente, es necesaria y esencial para lograr obtener información clara, útil y fidedigna de los planos que pueda ser utilizada para una diversidad de propósitos, como por ejemplo, para la fabricación de partes y componentes, para mantenimiento de equipos y para generar bases de datos, etc.

5. Conclusiones

En este artículo se han presentado las metodologías del diseño de equipos originales y la ingeniería inversa como medios para generar e interpretar planos de fabricación. Las principales conclusiones se resumen en los puntos siguientes:

- Los planos de fabricación son esenciales en el diseño de máquinas, partes y componentes. Por ello, es de suma importancia desarrollar nuevos métodos de generación y de interpretación de dichos planos. En este artículo se han presentado



a la metodología del diseño y a la ingeniería inversa como propuestas alternativas para generar e interpretar planos de fabricación.

- Los planos de fabricación formales, según las fases de la metodología del diseño, se generan en la parte del diseño a detalle, pues en esa fase se consideran las normas de dibujo, texto e información adicional. Sin embargo, la información geométrica y de manufactura de los productos se genera desde el análisis de los requerimientos del cliente hasta la última fase referida a la innovación tecnológica, por lo que los planos de fabricación formales solo representan una parte de toda la información asociada a un producto y no son definitivos, pues siempre hay algo que mejorar en cada máquina diseñada y transferida a la industria.
- Gran parte de las actividades de la manufactura y la fabricación dependen de una correcta interpretación de los planos de fabricación. Por ello, es necesario generar nuevas propuestas que permitan un camino sistemático para leer e interpretar los planos. Los programas y procedimientos de la ingeniería inversa son una opción.
- Le generación de planos de fabricación y su interpretación son dos actividades necesarias y esenciales en la ingeniería mecatrónica, pues los productos y los sistemas mecatrónicos se fabrican o se mejoran bajo el desarrollo sistemático de información geométrica y no geométrica y sobre la base de la interpretación sistemática de los planos. Las propuestas de generación e interpretación de planos de fabricación utilizando la metodología del diseño y la ingeniería inversa presentada en este trabajo, ayudarán a los alumnos de mecatrónica a desarrollar mejores prototipos y a mejorar diseños.

Referencias

- [1] Jiménez, E., Luna, G., Uzeta, C., García, L., Ontiveros, S., Martínez, V., Lucero, B., Pérez, P. *“Forward Design Process and Reverse Engineering Considerations”*. iNEER Special Volume: Innovations 2013 - World Innovations in Engineering Education and Research. Chapter 16., pp.197-207. 2013.
- [2] Bradley D. *“Mechatronics and the design of intelligent machines and systems”*, Editorial Stanley Thornes, United Kingdom. 2007.
- [3] Pahl G., Beitz, W. *“Engineering Design: A Systematic Approach”*. Springer, London, UK. 2007.
- [4] Ullman D. *“The Mechanical Design Process”*. Mcgraw-Hill, USA. 2003.
- [5] Jiménez E., Martínez, V., Reyes I., Ontiveros S., García, L., Luna, G., Vela L., Vázquez, J. *“Process Design Systematization for Specific Applications: Engineering Education Contribution”*. Journal of Modern Education Review, USA., Volume 3, No. 5, pp. 416–426. 2013.
- [6] Jiménez D. *“Aplicaciones de la metodología del diseño de equipos originales y de la ingeniería inversa en el desarrollo e interpretación de planos de fabricación”*. Tesis de Licenciatura en Ingeniería en Diseño Industrial. Universidad La Salle Noroeste. 2016.
- [7] Luna, G. Jiménez, E., García, L., Ontiveros, S., Reyes, L., Martínez, V., Delfín, J., Lucero, B. *“Importance of Research Procedure in Reverse Engineering for Engineering Education”*. Innovations 2011: World Innovations in Engineering Education and Research, ed. W. Aung, et al., iINNER, Potomac, MD, USA; pp. 379-390. 2011.
- [8] Raja V. *“Introduction to Reverse Engineering. Reverse Engineering an industrial perspective”*. Springer Series in Advanced Manufacturing. Chapter 1, pp.1-9. 2008.
- [9] Curtis S., Harston S., Mattson C. *“The fundamentals of barriers to reverse engineering and their implementation into mechanical components”*. Res Eng Design. Vol 22., pp. 245–261, 2011.
- [10] Jiménez E., García L., Delfín J., Lucero B., Martínez V. *“Trayectoria de las mediciones de la ingeniería inversa de partes y componentes”*. Simposio de Metrología. CENAM. 19 al 23 de septiembre. Qro, Querétaro. 2016.
- [11] Jiménez, E. *“Una propuesta para la sistematización de los planos de fabricación en el modelado de productos”*. Tesis de Doctorado en Ingeniería. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. 2013.
- [12] Malcolm C., Anderson D. *“Hybrid Feature Extraction for Machining Applications”*. Advances in Design Automation. Volume 2. P.p. 254-271. 1993.



Apéndice A

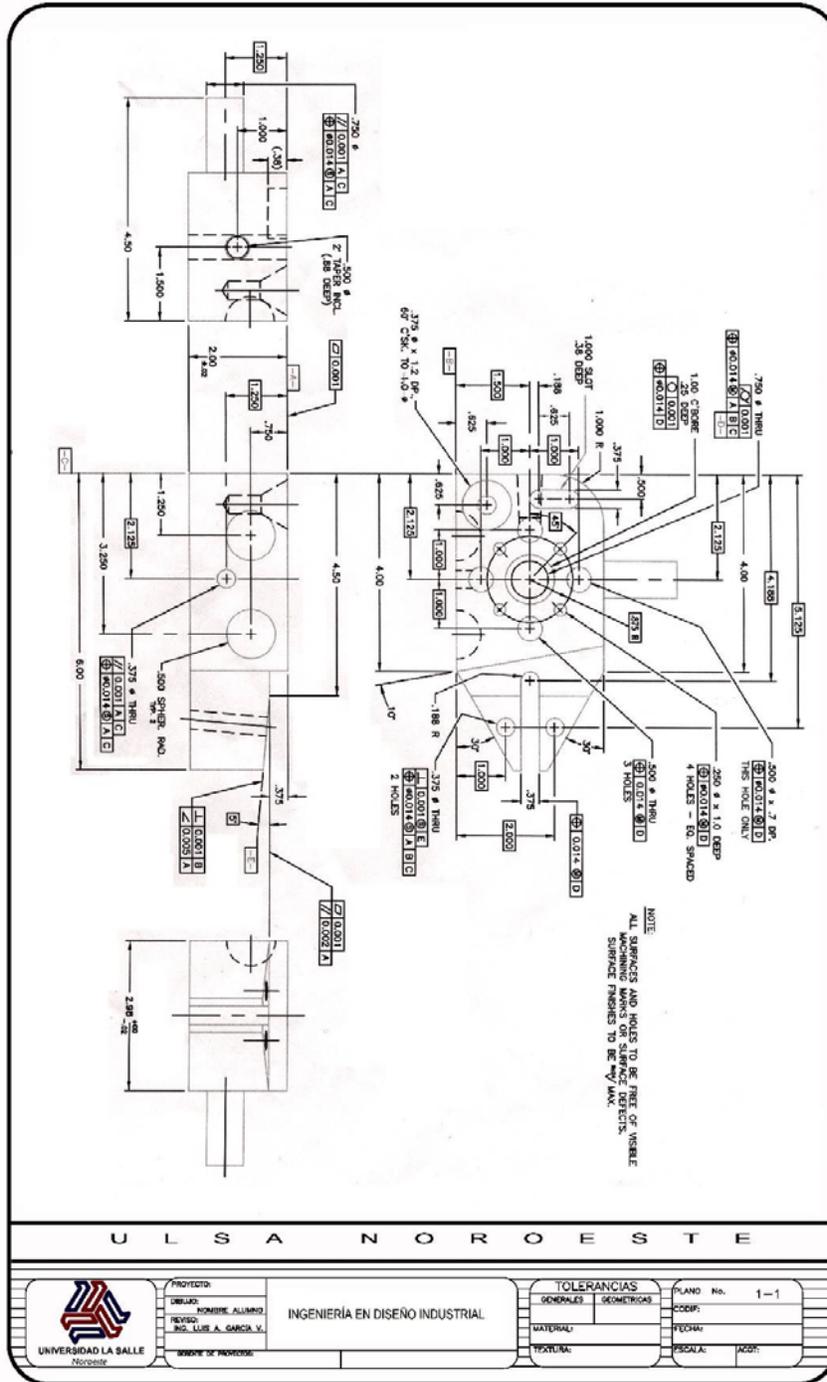


Figura A.1 Plano de fabricación desarrollado con la metodología de diseño



Panel solar fotovoltaico: estático contra móvil

Cruz Balmaceda Sergio Eduardo, Gutiérrez Sánchez José Manuel, Quintana García Daniel, Urbina Acosta Miguel Adrián, José Soledad López Gonzáles, Arnulfo Ibarra Camargo.

Instituto Tecnológico de Huatabampo
Av. Tecnológico S/N Col. Unión, Huatabampo Sonora.

Resumen

En el siguiente texto se muestra información sobre el trabajo de investigación en el cual se compara el voltaje obtenido de un panel solar con una estructura móvil que sigue el movimiento del sol a través de dos ejes y otro panel solar idéntico que se mantiene estático durante el transcurso del día. Primeramente se brinda al lector la información que se consideró pertinente para poder adentrarse un poco en la investigación y se pueda comprender de una mejor manera la aplicación del experimento y la interpretación de los resultados obtenidos. Dicha información abarca lo que es la energía solar que es la fuente que se busca aprovechar por ser una energía limpia, el panel fotovoltaico que convierte la energía del sol en energía eléctrica y los tipos de sistemas que existen para lograr este fin. Después de esa información se continúa por describir la forma de realizarse el sistema de control y de adquisición de datos utilizando placas de desarrollo Arduino UNO para después continuar con la experimentación y muestreo de resultados del sistema. Seguidamente se da a conocer el análisis de resultados donde es posible interpretar de forma visual y comparativa el comportamiento de los dos sistemas evaluados. Al final se presentan las conclusiones obtenidas al terminar la etapa de pruebas donde se describe nuevamente el análisis sobre la optimización en la captación de energía solar en paneles fotovoltaicos con sistemas móviles, se hace mención de los beneficios a gran escala y se termina por brindar algunas recomendaciones para personas que quieran replicar o hacer mejoras en la investigación y se sugiere una nueva investigación orientada a la mejora del costo del sistema de seguidor solar, que podría tener una gran ventaja en caso de aplicarse de forma masiva.

Palabras clave: Energía solar, panel solar, seguidor solar, control PID.

1. Introducción

Hoy en día están en alza el uso de energías renovables debido al estado del planeta y el deterioro que causan el uso de las energías convencionales o la producción de las mismas. La energía solar es una opción óptima en esta región (región de Sonora) ya que gran parte del año se cuenta con gran irradiación solar y es una de las regiones a nivel mundial con mayor riqueza en este ámbito energético. Los sistemas de control pueden utilizarse en la actualidad para la obtención de este tipo de energías ya que permiten que el comportamiento del sistema al que se le aplica dicho control sea deseado y adecuado para los fines de conveniencia. En los sistemas embebidos son de gran utilidad ya que asegurar un comportamiento controlado permite prescindir que existan personas que tengan que estar cerca monitoreando en todo momento el trabajo que se esté llevando a cabo, pudiéndolo hacer inclusive, de manera no presencial, ya que el error es reducido a una cantidad mínima de forma automática.

Este sistema aplicado a un sistema de seguimiento solar garantiza que se obtenga una óptima eficiencia, en la medida posible de las características del dispositivo (panel fotovoltaico), durante todo el lapso del día en que existe luz natural del sol, contrastándolo con un sistema estático.

2. Energía Solar



La energía solar es la energía que se obtiene mediante la captación de la luz y el calor emitidos por el sol, esto se conoce como radiación solar. Y es mucho más abundante comparándola con otros tipos de fuentes de energía las cuales son no renovables, como se muestra en la figura 1.

La radiación solar que llega a la Tierra puede, aprovecharse por medio del calor que produce a través de la absorción de la radiación, por ejemplo en dispositivos ópticos o de otro tipo. La radiación solar es una de las llamadas energías renovables, particularmente del grupo no contaminante, conocido como energía limpia o energía verde.

La potencia de la radiación varía según el momento del día, las condiciones atmosféricas que la amortiguan y la latitud. Se puede asumir que en buenas condiciones de irradiación el valor es de aproximadamente 1000 watts por m² en la superficie terrestre. A esta potencia se le conoce como irradiación [1].

Según informes de Greenpeace, si se llevaran a cabo las inversiones necesarias en granjas solares, e instalaciones domésticas, la energía solar fotovoltaica podría suministrar electricidad a dos tercios de la población mundial en 2030 [4].

2.1 Energía solar fotovoltaica.-

En tan sólo una hora, el Sol transmite más energía a la Tierra que la que es consumida en un año. Esta es la razón por la que la energía solar será uno de los principales pilares para la producción de energía en el futuro. Junto al uso de la energía solar para producir calor (energía solar térmica), el Sol será también utilizado para generar energía eléctrica, a lo que también es conocido como energía solar fotovoltaica (FV) [2].

Con la tecnología fotovoltaica, la luz de Sol es convertida directamente en electricidad. La luz que llega a las celdas solares libera su energía a los electrones que éstas contienen. Dichos electrones, una vez conectados a una carga, generan una corriente eléctrica [5]. Dicho proceso no requiere necesariamente radiación solar directa, aún en condiciones de luz difusa como cielos nublados, es posible obtener hasta un 50 % de la producción de un día normal. Las garantías típicas de manufactura en pruebas de durabilidad son de 25 años [2].

3. Paneles fotovoltaicos.

El elemento principal de cualquier instalación de energía solar es el generador, que recibe el nombre de célula solar. Se caracteriza por convertir directamente en electricidad los fotones provenientes de la luz del sol. Su funcionamiento se basa en el efecto fotovoltaico.

Una célula solar se comporta como un diodo: la parte expuesta a la radiación solar es la N, y la parte situada en la zona de oscuridad, la P. Los terminales de conexión de la célula se hallan sobre cada una de estas partes del diodo: la cara correspondiente a la zona P se encuentra metalizada por completo (no tiene que recibir luz), mientras que en la zona N el metalizado tiene forma de peine, a fin de que la radiación solar llegue al semiconductor como se observa figura 2.

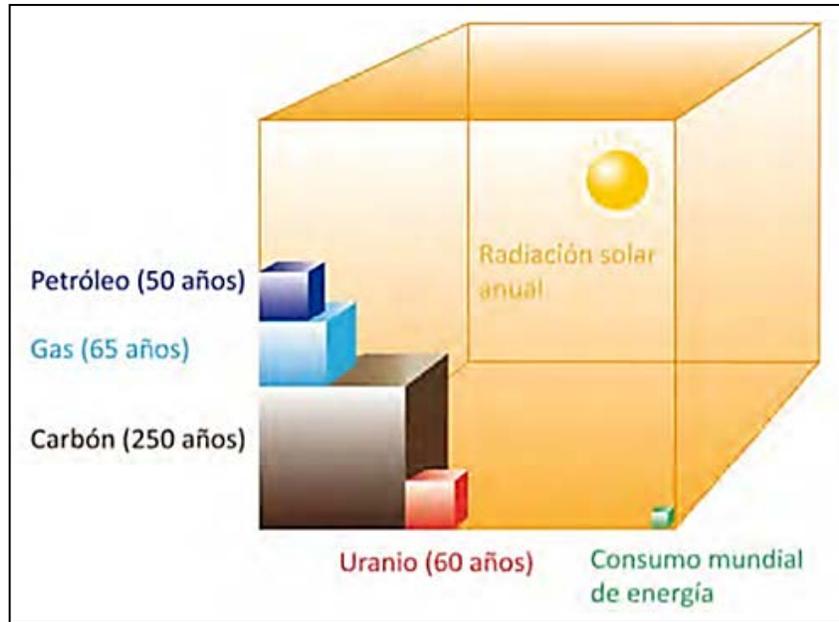


Figura 1. Comparación de los recursos energéticos mundial [2].

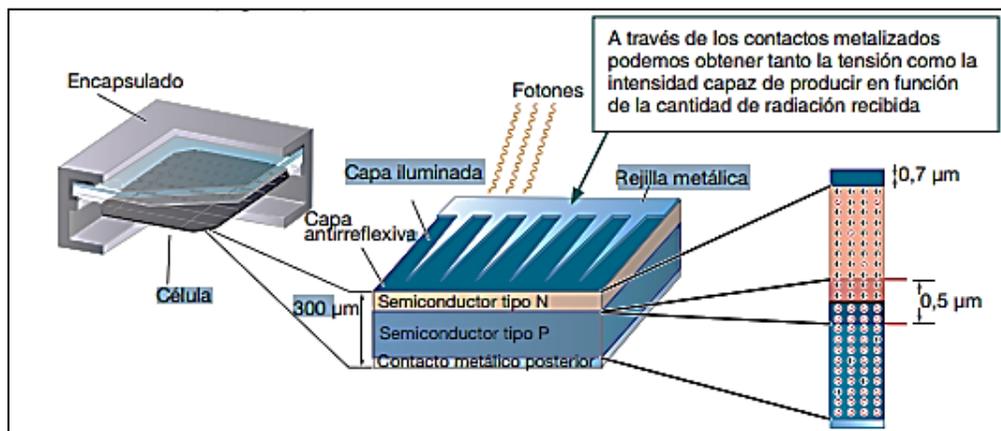


Figura 2.- Estructura de la célula o celda solar [3].

Un panel solar o módulo fotovoltaico está formado por un conjunto de células, conectadas eléctricamente, encapsuladas, y montadas sobre una estructura de soporte o marco. Proporciona en su salida de conexión una tensión continua, y se diseña para valores concretos de tensión (6 V, 12 V, 24 V), que definirán la tensión a la que va a trabajar el sistema fotovoltaico.

4. Sistemas de captación solar.

En los sistemas solares fotovoltaicos existe la posibilidad de emplear elementos seguidores del movimiento del Sol que favorezcan y aumenten la captación de la radiación solar.

Existen tres tipos de soporte para los colectores solares:

- Colocación sobre soporte estático:



Soporte sencillo sin movimiento. Dependiendo de la latitud de la instalación y de la aplicación que se quiera dar se dotan a los paneles de la inclinación más adecuada para captar la mayor radiación solar posible. Es el sistema más habitual que se encuentra en las instalaciones.



Figura 3.- Panel solar o fotovoltaico [3].

- Sistemas de seguimiento solar de 1 eje:

Estos soportes realizan un cierto seguimiento solar. La rotación del soporte se hace por medio de un solo eje, ya sea horizontal, vertical u oblicuo. Este tipo de seguimiento es el más sencillo y el más económico resultando sin embargo incompleto ya que sólo podrá seguir o la inclinación o el azimut del Sol, pero no ambas a la vez.

- Sistemas de seguimiento solar de dos ejes:

Con este sistema ya es posible realizar un seguimiento total del Sol en altitud y en azimut y siempre se conseguirá que la radiación solar incida perpendicularmente obteniéndose la mayor captación posible.

Actualmente existen muchos trabajos en los cuales se realizan cosas similares a las que aquí se hacen, siempre tratando de optimizar el funcionamiento de la captación energía fotovoltaica, en algunos casos se diseñan y modelan sistemas por medio de diferentes técnicas, en algunos utilizan la lógica difusa [6], algunos más utilizan otras técnicas de control inteligente, tal es el caso de un método de detección, orientación y seguimiento por luminosidad diferencial inteligente [8] y algunos más utilizando diferentes tipos de algoritmos mediante los cuales se busca que el área del panel fotovoltaico permanezca en posición perpendicular a la radiación lumínica de la fuente de luz [7]. En todos estos artículos, el objetivo en común es mejorar la eficiencia de la captación de energía, haciendo uso del control inteligente para llevar a cabo esta tarea. La diferencia en el funcionamiento de un panel con este tipo de control y uno el cual no tiene un control y solo está estático, debe de ser capaz de apreciarse mediante la comparación de ambos sistemas en iguales condiciones atmosféricas.



5. Seguidor Solar de dos ejes.

Se diseñó y elaboró un sistema seguidor solar de dos ejes, como se muestra en la figura 6, para colocar a un panel fotovoltaico, en la mejor posición para captación de la luz solar. Dicho sistema seguidor está compuesto por la base, sobre la cual se encuentra montada la estructura de soporte para el panel solar fotovoltaico, uno como el de la figura 3, este soporte es capaz de girar 180 grados paralelamente a la superficie de la base y esto gracias a un motor de corriente directa. Gracias al motor de corriente directa que se encuentra colocado en la estructura (el cual se aprecia claramente en la estructura, eje superior, en la figura 6) el panel es capaz de girar también para buscar el mejor ángulo de incidencia solar, desplazándose en un ángulo perpendicular a la superficie de la base. A este sistema se le aplicó un control PID (Proporcional-Integral-Derivativo) de forma digital para garantizar un correcto comportamiento a largo de todo el día. Dicho control fue programado en una tarjeta Arduino UNO R3, que utiliza software libre.

5.1 Controlador PID.

Para realizar el cálculo del controlador PID se obtuvo primeramente la función de transferencia de la planta (seguidor solar, ecuación (1)) y posteriormente se realizaron los cálculos pertinentes.

$$\frac{\theta(s)}{p_m(s)} = \frac{36.6369}{s^2 + 20.883s + 4.2683} \quad (1)$$

Donde $\theta(s)$ es el desplazamiento angular de la planta, y p_m es el par torsor del motor.

$$P.I.D. = \frac{2(s+2)^2}{s} \quad (2)$$

La ecuación 2, de PID que se muestra anteriormente, fue como quedó al final, después de darle una sintonización fina para que respondiera de acuerdo a las especificaciones de funcionamiento que se le asignó al sistema, donde $(s + 2)^2$ representa la ubicación de dos ceros del controlador PID aplicado a la planta.

En la figura 4 se muestra el diagrama de bloques del sistema de control. Donde se puede apreciar que se trata de un sistema de control de lazo cerrado con la retroalimentación de los sensores con una ganancia unitaria.

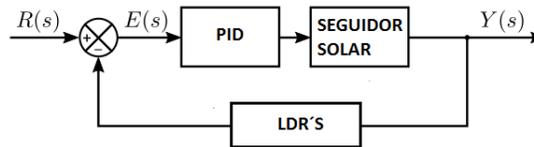


Figura 4. Diagrama en bloques del sistema aplicándole control PID.

El comportamiento del sistema después de aplicarle el controlador PID fue procesado en Matlab para verlo de una forma gráfica, y darle los ajustes necesarios, este controlador fue diseñado para un tiempo de respuesta rápida y que se estabilice en aproximadamente dos segundos. En la figura 5 se puede apreciar el comportamiento del sistema controlado ante un escalón unitario.

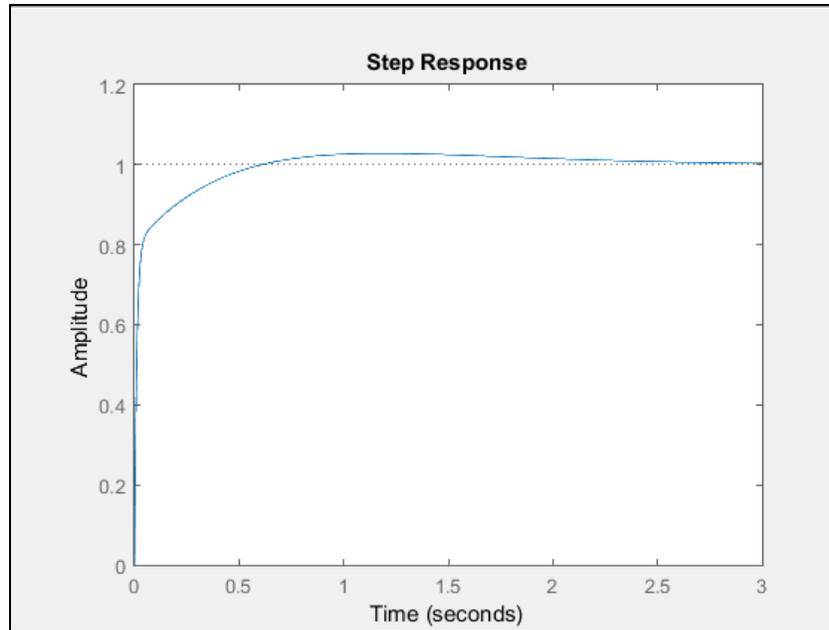


Figura 5.- Respuesta del sistema ante un escalón unitario.

5.2 Adquisición de datos.

Además del sistema de control se tiene otro sistema, el cual es para la adquisición de datos, para ello se utiliza otro Arduino UNO R3 en el cual se programa la recepción de datos a través de varios dispositivos externos como lo es reloj externo, para registrar fecha y hora en que se hace el muestreo, las mediciones de los voltajes producidos por el panel solar se hacen por medio de un sensor de voltaje que transforma el valor obtenido a un nivel que pueda leer el microcontrolador de la placa Arduino UNO R3 y después de obtener estos valores, los escribe en una tarjeta de memoria SD por medio de un módulo "SD card" creada para esta plataforma.

Aparte de la fecha, hora y voltaje del panel se guarda un número identificador de registro para tener un mayor control del mismo.

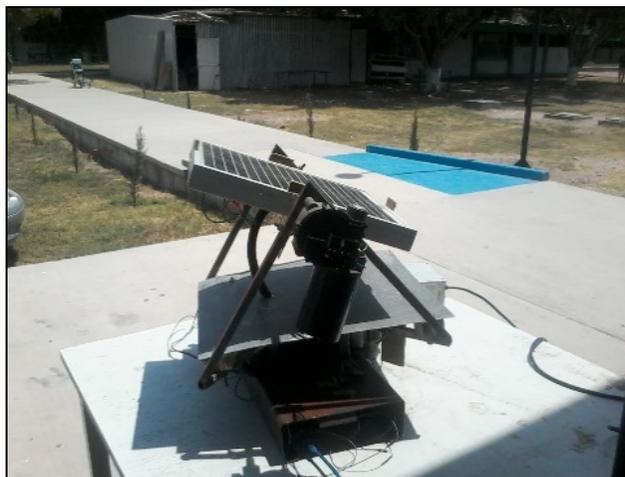


Figura 6.- Seguidor solar de dos ejes.



El sistema está diseñado para que al final del día o de toma de las muestras se retire la tarjeta SD, esta se ingresa en la computadora y mediante el software de NI (National Instruments), LabView se procesan las muestras y se almacenan en una base de datos creada en Microsoft Access, además en la misma interfaz creada en LabView se grafican las muestras para observar el comportamiento de ambos sistemas y poder compararlos en una primera instancia de manera visual.

6. Análisis de resultados.

El comportamiento del sistema fue satisfactorio, ya que dio un correcto seguimiento al sol, además de tener la captura de los datos y realizar la comparación de ellos mediante el instrumento virtual creado en el software de programación LabView.

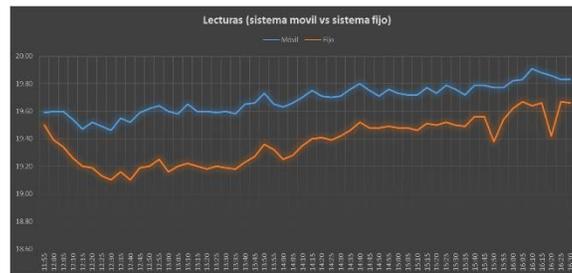


Figura 7. Gráfica del comportamiento de los voltajes.

En la figura 7 se puede observar claramente, donde la línea azul representa al voltaje generado por el panel móvil y la línea naranja representa al panel estático. Se puede observar la variación en la generación entre ambos paneles, en la móvil es mayor que en la estática pero las variaciones se mantienen constantes. La cantidad de muestras tomadas fueron 55 en un día normal, soleado, sin nubosidad, desde las 11:55 hasta las 16:30, cuyos resultados son los que se muestran en este artículo en la gráfica de figura 7, con un total de 4 horas con 35 minutos.

7. Conclusiones

En base a las pruebas realizadas se verificó, tal y como se esperaba, que efectivamente un seguidor solar es muy útil en un sistema de captación solar. Además este tipo de sistemas son de mayor utilidad en grandes instalaciones donde se utilizan grandes lotes de paneles solares, en esta ocasión las pruebas se realizaron en dos pequeños paneles y la diferencia de producción quizás no sea tan notoria a simple vista, sin embargo, cabe destacar que si se hablara de un gran lote, multiplicando esos valores en la escala correcta se podría apreciar la gran pérdida que se genera diariamente, y si aunado a eso se realiza la sumatoria de esas pérdidas diarias en determinado lapso de tiempo, se puede observar la gran cantidad de energía desperdiciada o no aprovechada por los sistemas de paneles solares. Los sistemas de control para este tipo de sistemas es relativamente sencillo, solo se debe tener en consideración utilizar materiales con características conocidas y con formas básicas para que no se tornen complejos los cálculos del controlador PID, el sistema de adquisición de datos también es relativamente sencillo y además de económico.

Si alguien desea continuar con esta investigación cuando se realice el sistema de control se deben de considerar los elementos a utilizar en el sistema, especialmente las potencias a manejar pues en base a ello se deberán adquirir los elementos intermedios (entre la fase de potencia y control) y los elementos de control y adquisición de datos. Se recomienda hacer uso de motores de cd o motores a pasos para tener un mejor control, esto es para reaccionar correctamente a los errores de entrada y corregir el ángulo de salida. De igual manera es importante tomar en cuenta las fuentes



utilizadas especialmente por el ruido que estas pueden meter en el sistema de control y especialmente en el sistema de adquisición de datos, ya que estos últimos son muy sensibles a las perturbaciones generadas.

Otro punto importante a considerar, es que no se hace una investigación para optimizar la relación costo-beneficio del sistema móvil, es recomendable realizar dicha investigación para tener un panorama más amplio sobre la viabilidad del seguidor solar, ya que esta investigación solo se compara los resultados obtenidos por los paneles y no la inversión hecha en las estructuras de los mismos.

Referencias

- [1] mexicosolar.com. Energía Solar. Recuperado el 12 de febrero de 2016 de:
<http://www.mexicosolar.com/esolar.html>
- [2] renacmexico.com Energía solar fotovoltaica como fuente de energía renovable global. Recuperado el 12 de febrero de 2016 de:
http://www.renacmexico.com/fileadmin/user_upload/Download/RENAC_Mexico/Introduccion_fotovoltaica.pdf
- [3] <http://assets.mheducation.es> (12 de febrero de 2016). Componentes una instalación solar fotovoltaica. Recuperado el 12 de febrero de 2016 de:
<http://assets.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf>
- [4] www.greenpeace.org La energía solar puede dar electricidad limpia a más de 4 millones de personas para el 2030. Recuperado el 12 de febrero de 2016 de:
<http://www.greenpeace.org/espana/es/news/2010/November/la-energ-a-solar-puede-dar-ele/>
- [5] Montes, J., Fernández, A., Jiménez C., Lecuona A., Mellado F., Plaza J., Ramos V., Sala G. Energía Solar Fotovoltaica. Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, Ibergraphi 2002.
- [6] Robles, C. & Villa, G. "Control del punto de máxima potencia de un panel fotovoltaico, utilizando lógica difusa", TÉLÉMATIQUE. Vol. 10, edición No. 2, págs. 54-72, 2011.
- [7] Mejía, A. & Londoño, M. "Diseño e implementación de un seguidor solar para la optimización de un sistema fotovoltaico", Scientia Et Technica. Vol 1, No. 1, págs. 245-250.
- [8] Cardozo, D. & Jara, E. "Orientación por luminosidad diferencial. Detector y seguidor inteligente". FPUNE Scientific. No. 6

Análisis del funcionamiento de la guitarra acústica para el diseño y construcción

Díaz Álvarez Andrea

Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería, Centro Universitario
Cerro de las Campanas s/n, c.p. 76010, Santiago de Querétaro, Qro. México

Resumen

La modelación 3D así como el análisis numérico nos permite simular comportamientos físicos, estos auxiliares digitales nos permiten realizar una propuesta de diseño de una guitarra acústica antes de una construcción con materiales reales. Antes de poder realizar cualquier propuesta es necesario tener conocimiento formal así como comprender el comportamiento de la guitarra clásica. Observar y entender el impacto de cada uno de los elementos que conforman el instrumento es fundamental para realizar propuestas con valor. En este artículo se toma el instrumento como un sistema de vibradores acoplados los cuales se analizan de forma general para comprender la dinámica del instrumento. En este caso en particular se realizó un modelo y un análisis de elemento finito en algunas partes de la estructura de la tapa armónica utilizando para esto un método mecatrónico.

Palabras clave: guitarra clásica, sistema de vibración, vibración de cuerdas, estructura de la guitarra.

1. Introducción

1.1 La Guitarra

Las guitarras de 6 cuerdas más antiguas conocidas fueron construidas por Gaetano Vinaccia en Italia, Stradivarius también es conocido en el mundo de la guitarra ya que además de su amplio conocimiento en la construcción de violines, construyó algunas guitarras, la guitarra acústica se puede clasificar en familias : guitarra clásica, flamenca, de tapa plana y de tapa curva, para efectos de este artículo se hablará de la guitarra clásica como lo ilustra la figura (1).



Figura 8. Ilustración genérica de Guitarra Clásica, vista frontal, posterior y lateral.



El Modelo de construcción de la guitarra moderna fue propuesto por Antonio de Torres Jurado (1817-1892), una de sus principales aportaciones fue la introducción del abanico o patrón de varetas en la tapa acústica. La aportación de este laudero fue detonante para la elaboración de muchas otras propuestas de abanico a lo largo de los años, todas enfocadas al perfeccionamiento del sonido de la guitarra.[1]

Antonio de torres lleva a cabo varios experimentos en los cuales tanto la forma como la proporción de la guitarra son explorados, concluyendo que la parte más importante es la tapa acústica, su interés en la tapa acústica de la guitarra lo motivó a la construcción de una guitarra donde la parte posterior estaban hechas de cartón, esto con el fin de enfatizar y probar la importancia de la tapa acústica en la producción del tono.[2]

Rolf y Uwe clasifican el sonido producido por los instrumentos en 4 características principales.
[2]

1. Timbre
2. Ataque
3. Proyección
4. Y grado de posible variación de timbre

1.2 CAD y CAE en el desarrollo de la guitarra

Las actividades más importantes durante el proceso de ingeniería de un producto son las que se realizan a través de prototipos y ensayos, los recursos que se invierten en este procesos pueden ser quizá más costos y relevantes que la materialización del producto final, por lo que es importante establecer una metodología para asegurar que lo que se tiene pensando sea viable.

Dentro de las herramientas que se utilizan para el desarrollo e investigación de un producto se contemplan representaciones tanto virtuales como físicas. Cada una de estas representaciones es utilizada en etapas distintas de desarrollo de un producto o propuesta de diseño, estas se pueden dividir en 3 básicas como se ilustra en la tabla(1)

Tabla 1. Tabla de herramientas auxiliares, CAD, CAE, CAM y su participación en el estudio o desarrollo de un producto o propuesta de ingeniería.

Desarrollo o Estudio de:	Herramienta	Siglas
Forma	<i>Computer Aided Design</i> <i>Diseño asistido por computadora (2D o 3D)</i>	CAD
Comportamiento	Computer Aided Engeneering Uso de modelos virtuales para la simulación de comportamientos.	CAE
Fabricación.	Computer Aided Manufaturing Uso de modelos virtuales y software de post procesamiento para simulación de tiempos y viabilidad de fabricación	CAM

Los métodos tradicionales de desarrollo en diseño e ingeniería, proponen soluciones conservadoras basadas en la prueba y error, esto ser realiza con diseños sobredimensionados que están sujetos a los recursos con los que el investigador cuenta. El método tradicional puede representar una gran inversión debido al uso de recursos como lo son:



- Tiempo de gestión
- Materiales para la construcción de prototipos
- Banco de pruebas
- Captura de información
- Análisis de datos
- Interpretación de resultados

En el método tradicional de diseño y desarrollo, como se muestra en la figura (2), puede haber una re formulación de soluciones o incluso nuevas propuestas. El método tradicional permite cambiar elementos en la propuesta de diseño según los recursos asignados para el proyecto.

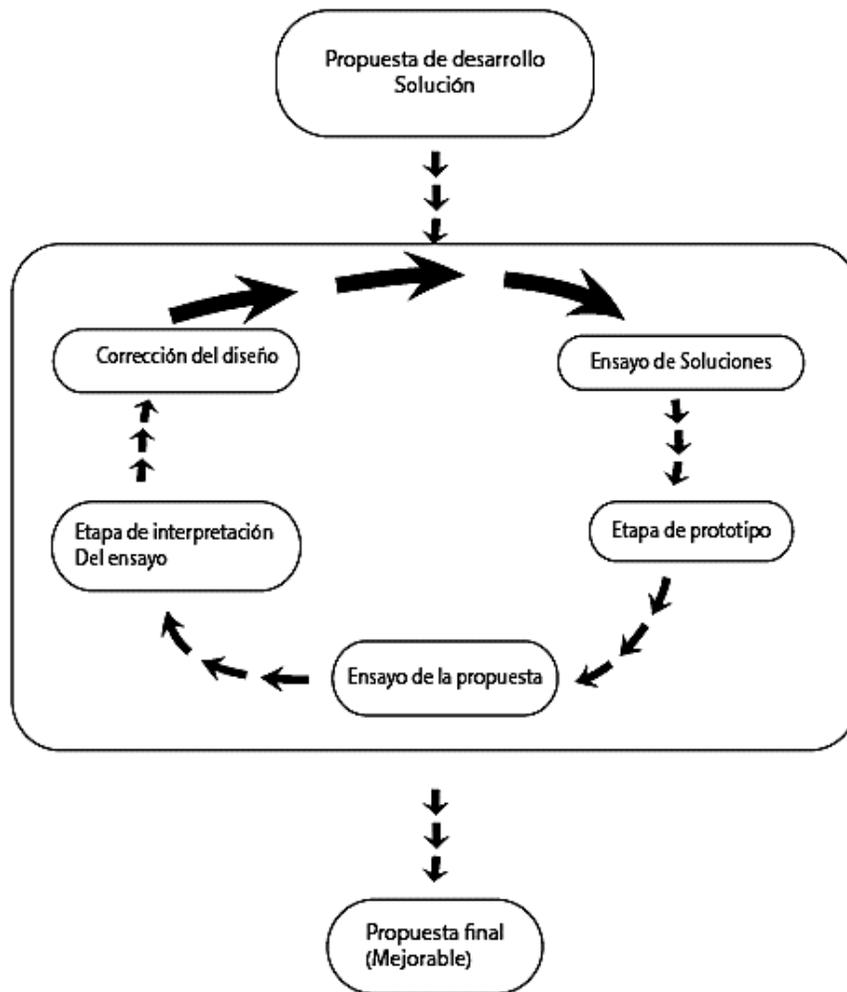


Figura 9. Representación del método tradicional para el desarrollo de un producto.

Actualmente la metodología tradicional sigue siendo válida sin embargo se deben considerar los tiempos y costos para la simulación y desarrollo de un producto, se requiere de la construcción de prototipos para las distintas áreas que se deseen desarrollar y analizar, ya que el objetivo principal de este método es el de generar un ensayo definitivo en condiciones reales.

Los avances tecnológicos, hacen que el CAD,CAM y CAE simplifiquen las tareas antes mencionadas, lo que nos permite reducir tiempos y costos de manufactura, al optimizar tiempos de cálculo e incluso análisis y síntesis de datos. En el diseño y construcción de la guitarra acústica, realizar prototipos de manera virtual no solo agiliza el proceso de diseño, si no que también nos permite un



análisis modular de las partes que lo componen, aún cuando el CAE es una herramienta fiable que nos permite la simulación del objeto en condiciones reales, no podemos descartar el uso de pruebas con prototipos físicos en laboratorio para validar el resultado obtenido de manera virtual.

La búsqueda por el perfeccionamiento del sonido de la guitarra clásica de 6 cuerdas ha sido objeto de investigación de varios autores (Torres, Boullosa, Elejabarrieta, Gorrostieta) quienes han propuesto modelos para el análisis de vibraciones, frecuencias, e incluso criterios de calidad para la construcción del instrumento, todas estas basándose en modelos numéricos y prototipos de manera virtual el comportamiento del instrumento, permitiendo a otros investigadores implementar y complementar dichos modelos.

El procesamiento de señales en el campo de la acústica incluye temas que pueden variar como, propagación de onda, consideración de amplitud, contenido del espectro de amplitud de onda y fase. La fase es de especial interés en la interacción de las ondas. Estas condiciones están presentes en todos los instrumentos musicales incluyendo la guitarra la cual es la razón del presente escrito.

El procesamiento de las ondas dan pie a estudios experimentales de análisis modal de vibraciones y de modelación tridimensional, los estudios se aplican para el comportamiento de los instrumentos de manera similar a violines y guitarras, los cuales comparten ciertas similitudes.

2. Guitarra acústica: Sistema de vibradores acoplados

Para un mejor entendimiento y análisis del comportamiento de la guitarra, es relevante la consideración del instrumento como un sistema de vibradores acoplados, donde la cuerda al ser percutida establece el inicio de una cadena de fenómenos físicos en los que la transmisión, radiación y absorción de vibraciones tiene lugar en distintas partes de la guitarra con el único fin de producir un sonido único característico del instrumento.

A groso modo se podría describir el funcionamiento de la guitarra de la siguiente manera, para referencia visual del funcionamiento ver figura 3.

- 1) La cuerda es percutida, radiando sonido apenas perceptible de manera directa.
- 2) La energía de la vibración de la cuerda percutida es transmitida a la tapa y puente.
- 3) El puente actúa esencialmente como parte de la tapa acústica que junto con la tapa o membrana por sus propiedades mecánicas es el elemento clave en la producción y transmisión de sonido a altas frecuencias.
- 4) La tapa posterior y costillas reciben la energía restante transmitida por la tapa acústica, que en conjunto genera movimientos, de compresión y expansión de aire dentro de lo que se denomina caja acústica.
- 5) Las vibraciones y movimientos que tienen lugar en la estructura de la guitarra, permite la amplificación y proyección del sonido por el cuerpo y boca del instrumento.
- 6) Las frecuencias bajas remanentes en la tapa acústica se transmiten hacia la tapa posterior y costillas.

El comportamiento de la guitarra acústica también se puede describir en un diagrama de funcionamiento tomando los elementos de la tapa acústica así como la tapa posterior, tal como se ilustra en la figura 4.

2.1 Cuerdas: Vibración y frecuencia.

Al percutir una cuerda en la guitarra clásica, ésta vibra, ejerciendo fuerzas con direcciones transversales y longitudinales sobre la el resto de la guitarra teniendo como resultado el sonido.

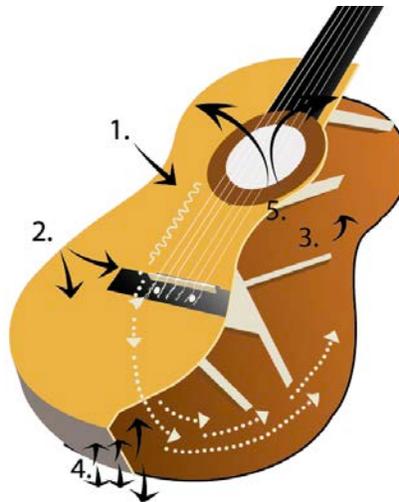


Figura 10. Representación gráfica general del funcionamiento de la guitarra clásica

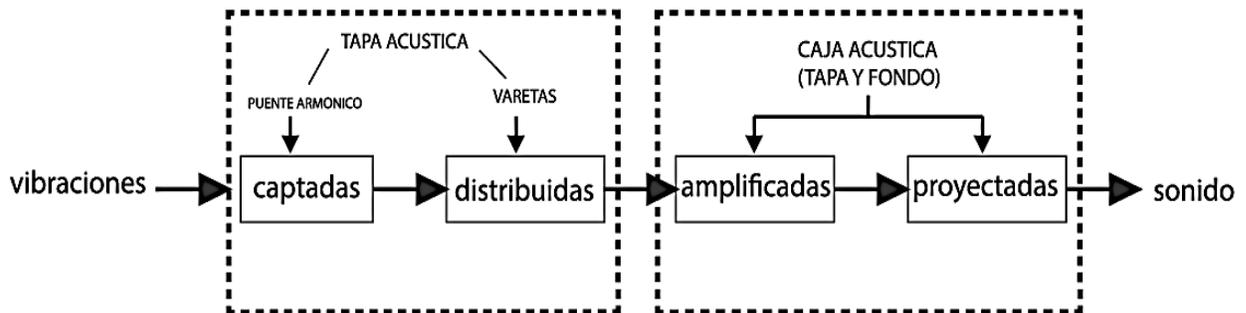


Figura 11. Diagrama de funcionamiento básico de la generación del sonido en la guitarra clásica.

La raíz de la frecuencia para una cuerda es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la tensión, de manera inversa proporcional a su longitud, y a la raíz cuadrada de su masa por unidad de longitud.[3] Esta relación se tiene en cuenta para la producción de diferentes tonos, dependiendo de la masa y tensión de cada cuerda, para la generación de un tono individual por cuerda se debe presionar en referencia a un traste, esta acción reduce la longitud de la cuerda, generando una nueva longitud de cuerda lo que se traduce en la ecuación(1). Donde L es la longitud de la cuerda en el ultimo traste. El numero resultante determinara el semitono o intervalo en relación entre dos y doce notas para crear la escala cromática $2^{1/12}$.

$$L [1 - 1/(2^{1/12})] \tag{1}$$

Las fuerzas longitudinales y transversales que generan en conjunto las cuerdas denominada "frecuencia alta" hacen resonar la membrana/tapa acústica y el puente, mientras que las "frecuencia baja" hacen resonar principalmente la tapa posterior y costillas. Esas fuerzas se pueden medir con la ecuación (2) donde T es la tensión, θ es el ángulo entre la cuerda y el cuello de la guitarra y E es el módulo eléctrico de la cuerda.[4]

$$FT = (T_0 + dT)\sin\theta, \text{ and } FL = T_0 + EA/L_0 dL \tag{2}$$

El método por el cual la cuerda es pulsada también afecta el sonido producido, ya que existen muchas otras fuerzas interactuando entre si, las frecuencias resultantes de la cuerda pulsada al aire se pueden visualizar en la Tabla 1.

**Tabla 2. Frecuencias y notas resultantes de la cuerda pulsada al aire.**

Cuerda	Nota	Frecuencia (Hz)	Frecuencia Redondeada (Hz)
6	E	82.407	82
5	A	110.000	110
4	D	146.832	147
3	G	195.998	196
2	B	246.942	247
1	E	329.628	330

2.2 El cuerpo de la guitarra

Las fuerzas estáticas y de torque en las cuerdas generan patrones de interferencia en la tapa de la guitarra [4], componente principal del cuerpo de la guitarra, donde la mayor parte de el sonido con frecuencias altas se genera y proyecta, para referencia de frecuencia y relación con las cuerdas y notas ver tabla 2.

Las ondas de sonido generadas por las cuerdas son transferidas a la tapa acústica, elaborada de madera, a través del puente generando patrones de resonancia en la cara de la guitarra como se muestra en la figura 5. El patrón de onda generado cambia dependiendo del sistema de abanico así como del espesor y tipo de material. La madera, material de construcción de la guitarra, es anisótropo lo cual lo convierte en un elemento complejo para el análisis numérico, sin embargo es uno de los materiales clave en el desarrollo y formalización de la manufactura de instrumentos musicales.[2]

Teniendo en cuenta que la tapa frontal de la guitarra juega un papel principal en la generación y distribución de energía para la producción de sonido, a lo largo de décadas se han propuesto diversos modelos de abanicos, como principal ejemplo está el modelo Torres el cual es el más utilizado actualmente, la figura 6 ejemplifica algunos de los modelos que se pueden encontrar en la guitarra moderna.

La selección de material afecta el comportamiento de la propagación de onda en la tapa acústica, los lutereros elijen el material que consideran cumple con sus requerimientos de transmisión de sonido y pérdida de energía, entre menos denso sea una madera, esta mejora su capacidad de distribución de onda. En México las maderas utilizadas con mayor frecuencia para la tapa acústica es el cedro, palo de rosa Brasil y de la India [6], maderas las cuales su densidad se muestra en la tabla 3.

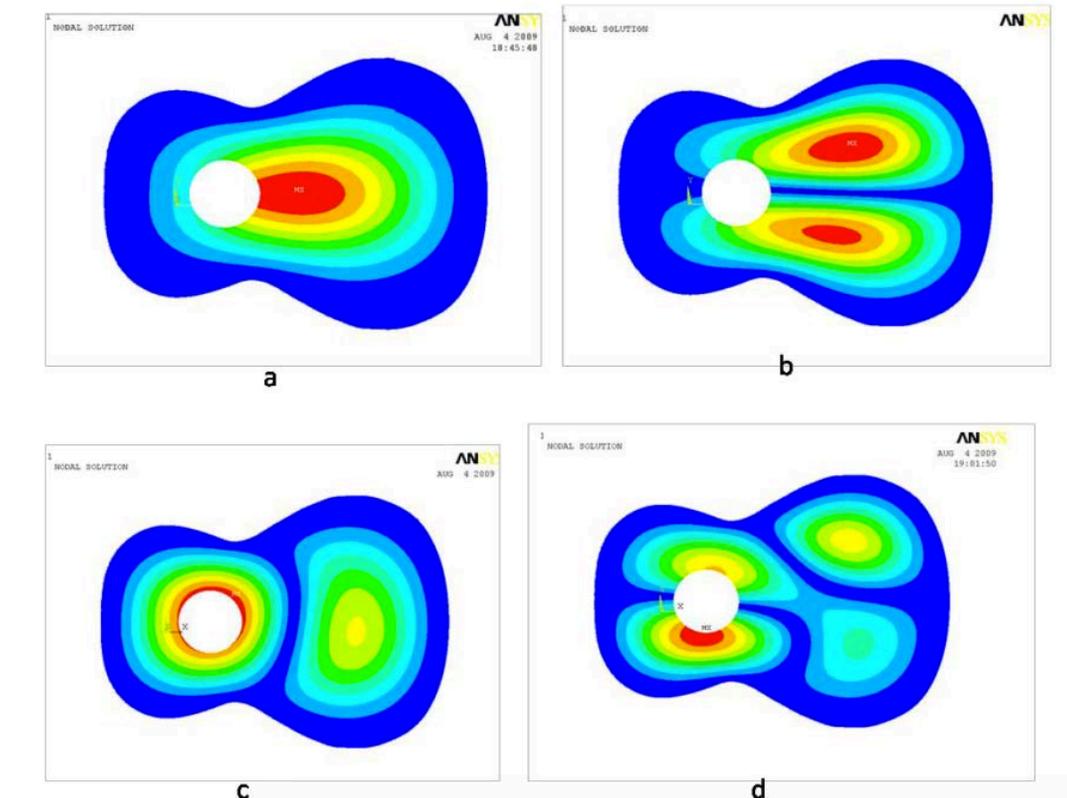


Figura 12. Visualización de modos de vibración, elemento finito, a) 193.8 Hz , b) 306 Hz , c) 360 Hz, d) 552 Hz. [2]

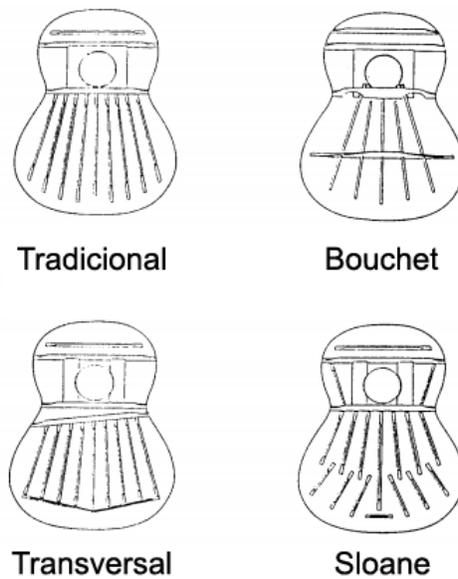


Figura 13. Representación simplificada de sistemas de abanicos utilizados en la guitarra. [5]



Tabla 3 Densidad de maderas usadas en la construcción de la guitarra acústica.

Tipo de madera	Densidad
Rosa de la India (rose Wood India)	650-850 kg/m ³
Rosa de Brasil (Rosewood Brasil)	730-870 Kg/m ³
Cedro (Cedar)	320-430 kg/m ³

Al examinar la física detrás del instrumento, en específico la compresión y expansión de aire en la cavidad conformada por la tapa acústica, tapa posterior y costillas, resalta la importancia de la tapa acústica ya que no solo debe resistir la tensión de las cuerdas y distribuir las ondas si no que ésta también debe ser lo suficientemente flexible y resistente para soportar el movimiento generado por el aire dentro de la caja acústica conocido como el efecto Helmholtz de resonancia. La resonancia obtenida para las frecuencias bajas depende de el volumen de aire, forma de la caja acústica y tamaño de la boca de la guitarra.

3. Tapa acústica como sistema, modelo sugerido para el análisis de vibración de nuevos diseños.

Como se menciona anteriormente la tapa acústica de una guitarra puede ser construida de diversos materiales, estos con una longitud aproximada de 500mm y un espesor variable que va desde los 3mm a 1.5mm, el espesor de la tapa varía en su uniformidad según su proceso de manufactura.

Gorrostieta et al 2012 propone que la membrana de la tapa acústica se puede considerar como W en R2, las condiciones de barrera se pueden dividir en dos partes, la primera con las costillas γ_0 y el límite de la boca γ_1 .

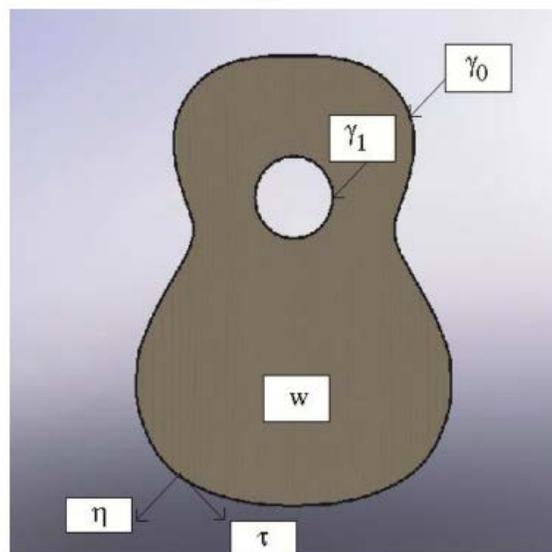


Figura 14. Descripción de la tapa superior o membrana, condiciones de barrera. [2]



Los componentes normales a W en el exterior de la tapa superior son consideradas como $\eta=(\eta_x, \eta_y)$ como se ve en la figura 7. Los componentes tangenciales son orthonormales y se consideran como $\tau=(\tau_x, \tau_y)$. Las vibraciones en la tapa acústica están escritas en general como un campo de desplazamiento $\mu_p(x, y)$.

$$\mu_p = (\mu_x(x, y), \mu_y(x, y), \mu_z(x, y),) \quad (3)$$

La vibración se describe por el movimiento vertical, puede ser modelado por el grupo de ecuaciones (4).

$$\begin{aligned} \delta \rho_p \frac{\partial^2 u_p}{\partial t^2} + \text{div} \quad \text{Div} M &= f p \ln W \\ M - \delta^2 C \underline{e} (\nabla u_p) &= 0 \ln W \ln \gamma 0 \\ u_p = 0 \partial_n u_p &= 0 \\ (\underline{Mn}) \cdot \underline{n} &= 0 \ln \gamma 1 \\ (\underline{\text{Div}M}) \cdot \underline{n} + \partial_t [(\underline{Mn}) \cdot \underline{t}] &= 0 \ln \gamma 1 \end{aligned} \quad (4)$$

Donde M es el momento de flexión, $\text{Div}M$ el esfuerzo, ambas consideradas condiciones de frontera, son dos las condiciones de frontera físicas a considerar una de ellas es el límite superior donde se ensambla con las costillas $\gamma 0$, el otro límite a considerar es boca o agujero que se encuentra en la tapa acústica de la guitarra $\gamma 1$.

Donde, ρ es la densidad de la tapa de madera, la cual cumple con las medidas y parámetros de espesor de manufactura, C es el tensor fuerte, utilizado en la placa Kirchhoff-Love, en este caso usaremos los tres componentes simétricos correspondientes, M_{xx} , M_{yy} y M_{xy} , en la ecuación (5), se muestra la representación escrita. [7]

$$CM = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{E_x}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} - \frac{E_x\nu_{xy}}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} & 0 \\ \frac{E_{yx}\nu_{yx}}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} & \frac{E_x}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 2G_{xy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Donde,

E_x y E_y : corresponden al módulo de Young.

G_{xy} : Módulo de Shear

δ : Espesor de la tabla.

f_p : Densidad de la superficie cargada

∂_n y ∂_t : derivadas tangencial y normal

div : divergencia de vector de orden 2, considerada como escalar.

∇ : gradiente aplicado a una función regular de dos variables, el resultado en un vector de dos dimensiones $\nabla^{\mu p}(x, y) = (\partial_x \mu_p, \partial_y \mu_p)$

\underline{e} : tensor de operador lineal, este resultado en un tensor simétrico de orden 2.

Div : consideramos la divergencia Div como aplicada en tensores de orden 2.

En la práctica la ecuación toma en cuenta las diferentes pérdidas que se producen en la tapa acústica, entonces, a eso se le considera un modelo real.

El autor que propone éste modelo, considera importante recordar que la diferente pérdida de disipación que ocurre juega un papel importante en la percepción y calidad de sonido para la producción y manufactura de los instrumentos musicales, por lo que propone un modelo que tome en cuenta este fenómeno diferente; del mismo modo también considera importante considerar el efecto de las cuerdas como la fuente de entrada que se utiliza como el tema resonante para la tapa/placa. Por otro lado uno puede solo analizar la pérdida de características de la caja de sonido: pérdidas en los bordes por la absorción de algunos elementos utilizados en el ensamblaje de las costillas, lo mismo sucede con otros ejemplos de elementos que componen el puente que esta sujeto a la tapa acústica.



Las pérdidas de radiación se toman en cuenta de manera automática, debido al acoplamiento entre la placa y el aire. Otras pérdidas son causadas por el acoplamiento de las cuerdas y otras pérdidas internas que se asumen por las características visco elásticas así como la pérdida de origen térmico.

El término Visco Damping es utilizado para simular el fenómeno de retraso o delay, cómo el comportamiento del material permite una rango de dependencia despreciable con respecto al material presentado en la ecuación (6). En la ecuación se simplifica el coeficiente viscoso, n es considerado constante por toda la placa. La ecuación (7) es usada para considerar la reducción de buffer en términos de compresión del aire dentro de la caja, donde, R_p es considerado como el factor de amortiguamiento.

$$M = \delta^3 C^{\xi} (\nabla u_p) + n \frac{\partial}{\partial t} \delta^3 C^{\xi} (\nabla u_p), (n > 0) \quad (6)$$

$$\delta \rho_p R_p \frac{\partial u_p}{\partial r}, (R_p > 0), \quad (7)$$

Las ecuaciones 5 y 7 se pueden re-escribir como la ecuación (8) como en la Kirchhoff-Love de placa vibratoria.

$$\delta \rho_p \frac{\partial^2 u_p}{\partial t^2} + \left(1 + n \frac{\partial}{\partial t}\right) \text{div } \underline{\text{Div}} M \delta^3 C^{\xi} (u_p) + \delta \rho_p R_p \frac{\partial u_p}{\partial t} = f p, \quad (8)$$

Después, la solución general de ecuación general es como se muestra en el conjunto de ecuaciones (9) a continuación.

$$\begin{aligned} \delta \rho_p \frac{\partial^2 u_p}{\partial t^2} + \text{div } \underline{\text{Div}} M + \delta \rho_p R_p \frac{\partial u_p}{\partial t} &= f p, \ln W \\ M \cdot \delta^3 C^{\xi} (\nabla u_p) - n \frac{\partial}{\partial t} \delta^3 C^{\xi} (u_p) &= 0 \ln W \\ u_p = 0 \quad \partial_n u_p = 0 \ln \gamma 0 \\ (M \underline{n}) \cdot \underline{n} &= 0 \ln \gamma 1 \\ (\underline{\text{Div}} M) \cdot \underline{n} + \partial_t [(M \underline{n}) \cdot \underline{t}] &= 0 \ln \gamma 1 \end{aligned} \quad (9)$$

Además, la ecuación (10) define el operador K, obtenido de la placa Kirchhoff-Love.

$$K: u_p \rightarrow \text{div } \underline{\text{Div}} M \delta^3 C^{\xi} (u_p) \quad (10)$$

Para describir el comportamiento de la membrana de la placa, la ecuación (11) es considerada en conjunto con la solución presentada en la ecuación (12).

$$\delta \rho_p \frac{\partial^2 u_p}{\partial t^2} + \left(1 + n \frac{\partial}{\partial t}\right) k u_p + \delta \rho_p R_p \frac{\partial u_p}{\partial t} = f \ln W \quad (11)$$

+ condiciones iniciales

$$u_p(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos(w_n t) + B_n \sin(w_n t)) \Xi_n(x, y), \quad (12)$$

Basados en la experiencia los lauderos construyen las tapas sintiendo físicamente las características del instrumento, sus vibraciones, teniendo extrema cautela en el fulcro generado y el área en donde se genera, estas características pueden ser simuladas y predichas sin embargo los lauderos se basan en un conocimiento generado de forma heurística, lo que les lleva a construir con diferentes espesores en la tapa hasta obtener el sonido deseado, por otro lado, se pueden tomar decisiones en base a simulaciones numéricas y modelos antes de pasar a la fabricación del objeto físico, esto con el fin de optimizar recursos y comprobar resultados.

4. Conclusiones



La producción del sonido de la guitarra acústica se da por las vibraciones en la tapa y en la caja acústica, la tapa acústica es una membrana la cual tiene varetas como se pueden ver en la figura 6, dichas varetas son auxiliares tanto en la parte estructural como funcional de la guitarra.

La generación del sonido en la guitarra tiene como inicio la percusión de las cuerdas, al realizar esta acción las ondas y vibraciones son captadas en primera instancia por el puente que en conjunto con la tapa acústica son las encargadas de repartir la energía por el resto de la caja acústica, de ahí la importancia de dicho elemento y el interés tanto de los investigadores como los músicos en la investigación del tema.

A diferencia de la parte posterior y las costillas de la guitarra, la tapa acústica recibe y amplifica el sonido de en su mayoría frecuencias altas mientras que su parte contraria las frecuencias bajas, cabe mencionar que como la guitarra es un conjunto de resonadores, sería ilógico concebir una parte sin la otra, sin embargo la tapa armónica por ser la encargada de la distribución de la energía, como se puede apreciar en la figura 5, juega un papel protagonista.

Como recomendación se sugiere separar los elementos que componen a la guitarra según la frecuencia con la que se va a trabajar como se ejemplifica en la figura 8, sin olvidar que éstas forman parte de un conjunto de resonadores.

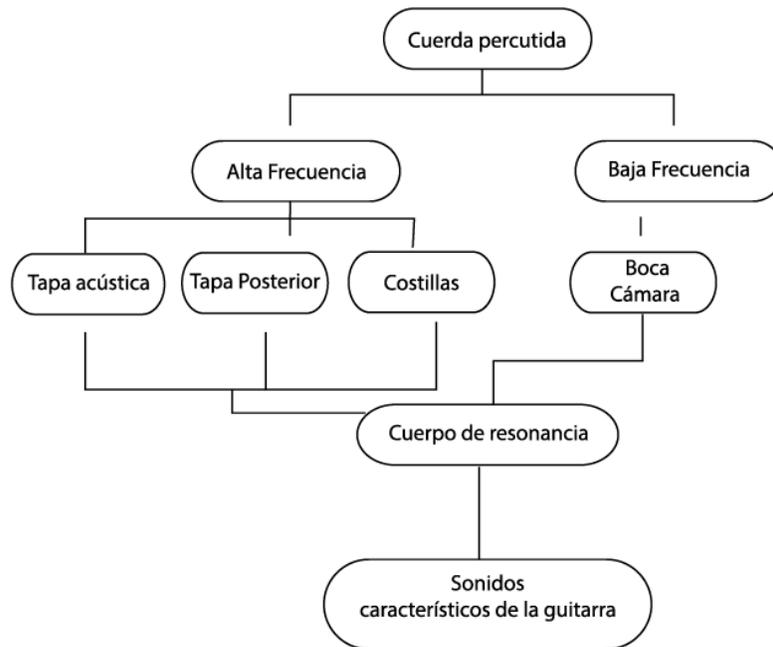


Figura 15. Esquema de elementos que interactúan según la frecuencia.

El uso de la modelación virtual como herramienta resulta fundamental para poder realizar un análisis numérico en software CAE, por lo que se debe de realizar lo más cercano a la realidad, el modelo matemático abordado por Gorrostieta et al 2013, toma en consideración múltiples factores que acercan el modelo a un ensayo real. El uso de modelos matemáticos existentes de simulación, así como de la interpretación de los mismos nos permite comparar resultados, replicar experimentos, si se desea se puede proponer un modelo de simulación. El objetivo del estudio de la guitarra y su exploración mediante modelos tridimensionales es el de comparar de manera simultánea diferentes versiones de abanicos así como visualizar y comprender los patrones de vibración de una superficie, como es el caso de la tapa acústica. Los modelos matemáticos descritos en el artículo permiten conocer los factores involucrados así como sus variables a tomar en cuenta en el desarrollo de un diseño de abanico, teniendo como resultado características sonoras de la guitarra acústica como lo son potencia, timbre, intensidad entre otros.



La metodología mecatrónica permitió realizar un análisis de la fabricación del instrumento al utilizar los modelos, simulación y los análisis de elemento finito, de esta forma se puede plantear una estructura diferente en la construcción de la tapa armónica.

Referencias

- [1] T. D. Rossing y G. Caldersmith, *Guitars and lutes*. 2010.
- [2] E. Gorrostieta-Hurtado, J.-C. Pedraza-Ortega, J.-M. Ramos-Arreguin, A. Sotomayor-Olmedo, y J. Pérez-Meneses, "Vibration analysis in the design and construction of an acoustic guitar", *Int. J. Phys. Sci.*, vol. 7, núm. 13, pp. 1986–1997, 2012.
- [3] R. R. Boullosa, F. Orduña-Bustamante, y A. Pérez López, "Tuning characteristics, radiation efficiency and subjective quality of a set of classical guitars", *Appl. Acoust.*, vol. 56, núm. 3, pp. 183–197, 1999.
- [4] N. H. Fletcher y T. D. Rossing, *The Physics of Musical Instruments, Second Edition*, Second. 1998.
- [5] S. Irving, *Clasic Guitar Construction*. New York, 1989.
- [6] J. Flores, B. Vidrio, y T. Reyes, *Investigaciones sobre competitividad innovación y desarrollo sustentable en las ciencias económicas administrativas*. 2014.
- [7] E. Ecache, A. Chaigne, G. Egoire Derveaux, y P. Joly, "NUMERICAL SIMULATION OF A GUITAR".



Correlación entre la señal SEMG y la dimensión fractal en movimientos de extensión/flexión

Correa Figueroa José Luis¹, Morales Sánchez Eduardo¹, Gonzalez Barbosa José Joel¹, Huerta Ruelas Jorge Adalberto¹, Cárdenas Pérez César²

¹Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Querétaro Cerro Blanco No.141 Col. Colinas del Cimatario, 76090 Santiago de Querétaro, Qro. México.

²Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey Campus Querétaro Epigmenio González 500, Fracc. San Pablo, 76130 Santiago de Querétaro, Qro. México

Resumen

Este documento presenta la correlación entre los valores de la dimensión fractal (FD), obtenido por los métodos de Higuchi y Katz, con la variación de amplitud de la señal superficie electromiografía. Esta variación en amplitud se relaciona con la posición del dedo causada por los movimientos de extensión y flexión en el músculo extensor digitorum communis. Se realizó un experimento para relacionar la variación de la amplitud de la señal con la variación de los valores de la dimensión fractal de medición de la señal electromiográfica de superficie (SEMG) y el cálculo en tiempo real los valores de FD. El experimento muestra que la dimensión fractal por el método de Higuchi no tiene relación con las variaciones de amplitud de la señal SEMG. Sin embargo la FD calculada por el algoritmo de Katz (KFD) se ve afectada por el grado de extensión/flexión del músculo. Este KFD imita las tendencias del valor RMS de la amplitud SEMG rectificadas, que es coherente con la predicción de la alta correlación entre KFD y las mediciones de amplitud de la señal.

Palabras clave: Bioseñales, electromiografía, dimensión fractal, Algoritmo Katz.

1. Introducción

La medición no invasiva conocida como electromiografía de superficie (SEMG) se utiliza cada vez más en diversas disciplinas médicas como la neurología, fisioterapia y ortopedia para el diagnóstico de trastornos neuromusculares y músculo-esqueléticos. Además de ayuda en el control de exoesqueletos y brazos robóticos. El análisis de la señal SEMG se basa en las características temporales, por lo general el uso de descomposición de RMS [1], y en términos de los parámetros del espectro de frecuencia como la transformada rápida de Fourier (FFT), que mide la amplitud de la señal en componentes de frecuencia, o la frecuencia media instantánea (MIF), que muestra el valor medio del espectro de frecuencias en un punto de tiempo [2]. Sin embargo, las señales de SEMG son complejas, aleatorias, no estacionarias, no lineales (sin relación lineal entre la actividad muscular y el patrón de señal SEMG), y no son generadas por fenómenos periódicos. Aunque estas técnicas no pueden caracterizar las señales SEMG quizá son necesarias como técnicas de perspectiva para caracterizarlas plenamente. Debido a que los métodos lineales que se utilizan para analizar las señales biológicas, no son muy confiables, ya que no tienen un comportamiento lineal, se debe tomar la decisión de analizar la SEMG con métodos no lineales tales como la dimensión fractal para lograr rastrear la posición del dedo. Las propiedades que describen señales no lineales pueden estimarse mediante el cálculo de medidas no lineales como la entropía, la correlación y dimensiones fractales, y la autocorrelación [3]. Una técnica no lineal introducida y desarrollada por Mandelbrot llamada "fractal" [4]. Los fractales se refieren a objetos o patrones que tienen "dimensión fraccional". Estos objetos o patrones exhiben lo que se llama "auto-similitud" [5]. Esto significa que



al ampliar los objetos o patrones se producirá una estructura que es similar en complejidad a la estructura de mayor escala. Un método para cuantificar el proceso fractal es medir la "dimensión fractal". La dimensión fractal de un proceso mide su complejidad, extensión espacial y su capacidad para llenar los espacios, además depende de la escala y tiene variaciones auto-similares en diferentes escalas de tiempo.

La bioseñal SEMG, como resultado de la suma de los potenciales de acción de unidades motoras (MUAPs) que viajan a través del tejido y se someten a la compresión y la magnitud espectral. Estos MUAPs son idénticos a la fuente, pero las diferencias en el contenido espectral surgen debido a la profundidad de la unidad motora, de los tejidos a través de los cuales viaja la señal y de las características del filtro pasa bajas [6]. Suponiendo una fuente de complejidad uniforme, la señal SEMG se puede considerar como auto-similar. Se ha demostrado que el análisis de la dimensión fractal (FD) de las señales en el dominio del tiempo puede llegar a ser una poderosa técnica con respecto a la caracterización de señales SEMG como una relación lineal entre la dimensión fractal y velocidades de flexión-extensión y la carga aplicada al músculo [7]. También se ha determinado que la dimensión fractal se puede utilizar para cuantificar la complejidad de los patrones de reclutamiento de unidades motoras [8]. Una aplicación obvia de estas propiedades de la SEMG es la identificación de pequeños cambios en las medidas de la actividad muscular como músculos interóseos durante contracciones isométricas [9]. La principal conclusión de estos estudios es que a medida que aumenta el nivel de la fuerza, la dimensión fractal (FD) también aumenta. Este resultado no es sorprendente porque los métodos de cálculo utilizados en estos estudios las FDs están altamente correlacionados con la amplitud de la señal de EMG [10].

2. Metodología

2.1 Sistema de adquisición de señales SEMG

La adquisición de la señal se realizó mediante electrodos de superficie hechos de AgCl gel sólido conductor en la configuración bipolar, colocados para medir la actividad del músculo extensor digitorum Communis (EDC), que es responsable de la ampliación del índice, corazón, anular y meñique. Para el procesamiento de la señal, se utilizó un sistema de adquisición de señales SEMG desarrolladas en el centro de investigación. El software de análisis desarrollado nos da valores de KFD y HFD de la señal SEMG en tiempo real durante la medición. El sistema de adquisición de que está configurado para obtener una matriz de valores de amplitud 550 (voltios) de la señal SEMG a una frecuencia de muestreo de 1 kHz. Una vez que la señal es adquirida por el equipo, es graficada por el software y archivada como un conjunto de señales.

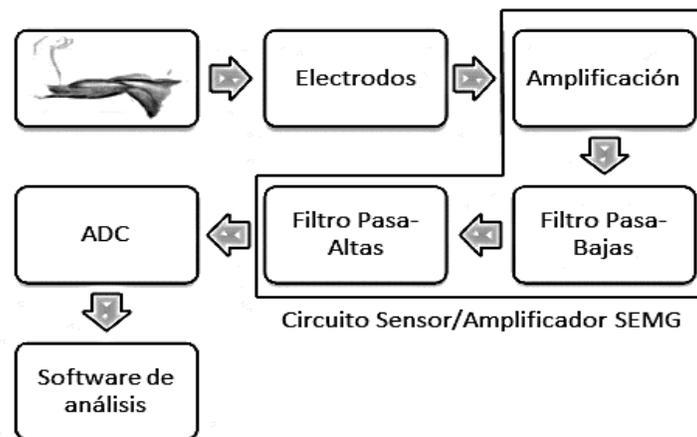


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema de adquisición SEMG.

La figura 1 nos muestra el diagrama de bloques del sistema que fue desarrollado en el centro específicamente para adquisición de señales de electromiografía. El sistema cuenta con 5 canales



de adquisición y utiliza una tarjeta de adquisición NI Compact DAQ 9174 junto con un módulo AI NI-9205 de National Instruments®. En la siguiente tabla se muestran las características.

Tabla 1. Características del circuito de adquisición de señales SEMG

Características	Valor
Frecuencia min de entrada	10Hz
Frecuencia máx de entrada	2.995 kHz
Voltaje mínimo de entrada	± 50 µV
Voltaje máximo de entrada	± 40 V
Ganancia	0 - 1000
CMRR	110 dB
Filtro Notch	60 Hz
Filtro Pasa Altas	20 Hz
Filtro Pasa Bajas	300 Hz

2.1 Software de análisis de señales

El software para la adquisición y análisis de señales SEMG se desarrolló en el LabVIEW® plataforma de instrumento virtual (ver. 2013 SP1) y el software Matlab (ver. R2014a) que se ejecuta en un ordenador portátil con Windows® 10 x 64 (build 10240), un AMD A10-5750M 2,5 GHz con procesador de 4 núcleos y 16 GB de RAM. Tiene un filtro digital que se utiliza para eliminar o reducir las frecuencias no deseadas de una señal utilizando diversos tipos de filtros estándar:

- Filtro Notch: 60 Hz
- Filtro de paso alto: 20 Hz
- Filtro de paso bajo: 300 Hz

El algoritmo dimensión fractal de Katz y el de Higuchi fueron programados en lenguaje Matlab® y se incrustó en el diagrama de bloques de un instrumento virtual en LabVIEW® para obtener el valor de KFD y HFD. Todos los valores de la media y la desviación estándar se calcularon con el software Microsoft Excel® (Ver. 2010), utilizando las fórmulas dadas por el software.

2.2 Algoritmo de dimensión fractal de Katz

La medición del fractal de una ola nos permite evaluar su complejidad. Además se obtiene un número que resume la cantidad de la información espacial en patrones. La dimensión fractal se calcula para una onda:

$$FD = \frac{\text{Log}(L)}{\text{Log}(d)} \quad (1)$$

Donde L es la longitud total del patrón (la suma de las distancias entre puntos sucesivos en la línea de trazos), d es el diámetro (la distancia máxima entre dos puntos cualesquiera de la onda). Para evitar la dependencia de la unidad de medición, MJ Katz [11] propuso dividir ambos D y L, tal como la distancia media entre puntos sucesivos, obteniendo:



$$FD = \frac{\text{Log}(n)}{\text{Log}(n) + \text{Log}\left(\frac{d}{L}\right)} \quad (2)$$

Donde n representa el número de pasos en la curva (el número de la muestra menos 1).

2.3 Algoritmo de dimensión fractal de Higuchi

El algoritmo de dimensión fractal Higuchi se calcula como sigue [12]:

Donde $X(1), X(2), \dots, X(N)$ representan un número de tiempo finito. Se utiliza para formar una nueva serie de tiempo:

$$X_k^m: X(m), X(m+k), X(m+2k), \dots, \\ X\left(m + \text{int}\left(\frac{N-m}{k}\right) \cdot k\right), \quad m = 1, 2, \dots, k \quad (3)$$

Donde m denota el tiempo de inicio y k denota el intervalo de tiempo de la serie. La longitud para cada X_k^m es como sigue:

$$L_m(k) = \frac{1}{k} \left[\left(\sum_{i=1}^{\text{int}\left(\frac{N-m}{k}\right)} |X(m+ik) - X_m(m+(i-1)k)| \right) \times \frac{N-1}{\text{int}\left(\frac{N-m}{k}\right) \cdot k} \right] \quad (4)$$

El número promedio de k como se define en la ecuación anterior, está exponencialmente relacionado al valor de dimensión fractal de la señal.

$$\langle L(k) \rangle \propto k^{-FD} \quad (5)$$

La solución a esta ecuación se encuentra utilizando regresión lineal:

$$FD = \frac{n \sum x_k y_k - \sum x_k \sum y_k}{n \sum x_k^2 - (\sum x_k)^2} \quad (6)$$

Donde:

$$x_k = \ln\left(\frac{1}{k}\right) \quad (7)$$

Además:

$$y_k = \ln(L(k)) \quad k = k_1, k_2, \dots, k_{min} \quad (8)$$

Y n es el número total de valores de k para los que fue calculada la regresión lineal.



3. Resultados

3.1 Señal SEMG simulada

Para probar la relación entre las variaciones de amplitud de la señal SEMG con diferentes valores de FD, señal SEMG se simuló usando un instrumento virtual dentro del software LabVIEW. La señal simulada tiene un valor máximo de amplitud de 2 mV, el ruido ambiente a 60 Hz de 0,1 mV a una frecuencia de muestreo de 1 kHz y con un tiempo de contracción del músculo de 1,5 segundos para un tiempo de medición total de 5 segundos. Esta señal se almacena en una matriz y es procesada en Matlab para calcular el KFD con 5 muestras por milisegundo.

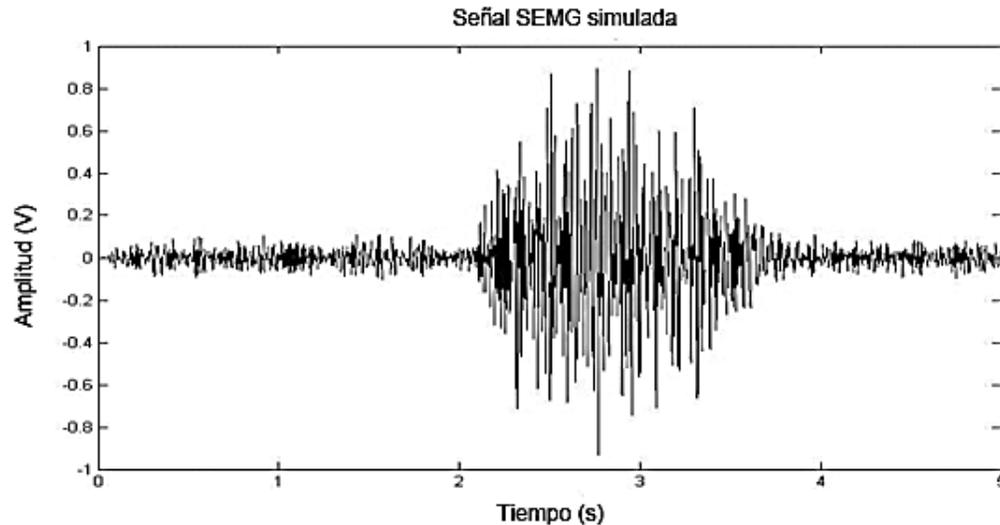


Figura 2. Señal simulada SEMG con LabVIEW®.

Se puede observar en las figuras 2 y 3 la correlación entre la señal SEMG simulada en el software y la señal KFD calculada en tiempo real durante la simulación. Para comprobar esta correlación se deberá analizar con una señal SEMG adquirida del movimiento de un músculo.

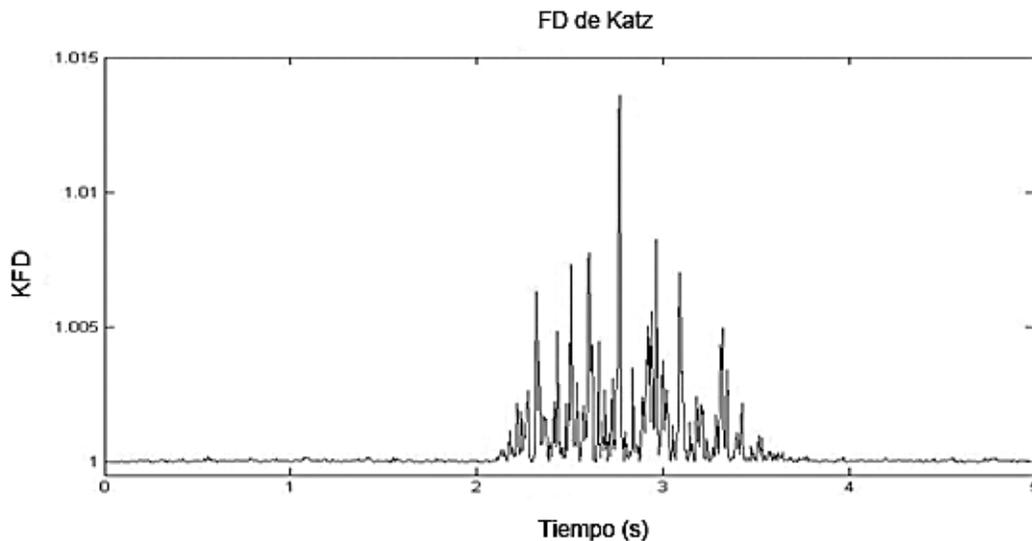


Figura 3. Los valores calculados a partir de KFD obtenidos de la señal SEMG simulada.



3.2 Señal SEMG adquirida de un ejercicio

Para validar la relación entre la variación de la amplitud de la señal SEMG con el cambio en la posición del dedo índice durante los movimientos de flexión y extensión, se utilizó la variación de los valores de dimensión fractal con los algoritmos de Katz y Higuchi. Hemos determinado un ejercicio donde la señal SEMG sería adquirida desde el músculo Extensor Digitorum Communis (EDC) manteniendo el dedo durante 30 segundos en la posición inicial de $\theta + 0^\circ$ (horizontal). Después, el dedo se mueve a la posición aproximada de $\theta + 45^\circ$ y se mantuvo allí durante otros 30 segundos. A continuación, el dedo se trasladó a la posición aproximada de $\theta + 90^\circ$ (estirada) y se mantuvo allí durante 30 segundos. En ese punto, el dedo vuelve a la posición de $\theta + 45^\circ$ y se mantuvo allí durante aproximadamente 30 segundos. Por último, el dedo podría volver a la posición inicial de $\theta + 0^\circ$ y se mantuvo allí durante los últimos 30 segundos. Este ejercicio se repitió cinco veces para validar la relación entre la posición del dedo y el valor FD.

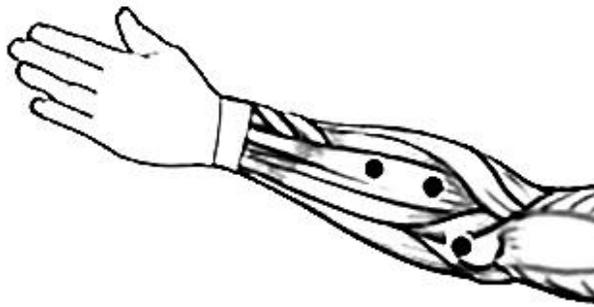


Figura 4. Colocación de los electrodos de AgCl para la adquisición SEMG del Musculus Extensor Digitorum

En la figura 5 podemos ver la señal en bruto SEMG adquirida por el software desde el músculo EDC durante el ejercicio propuesto anteriormente. Podemos ver la amplitud de la señal SEMG variando de acuerdo a la posición del dedo índice. Cuando el dedo está en la posición horizontal de reposo (θ°) el sistema de adquisición registra los valores de amplitud de señal más bajo y cuando el dedo está en la posición vertical de máxima extensión ($\theta + 90^\circ$) se registra en el sistema de adquisición los valores más altos de amplitud de la señal.

Como se ve en la tabla 2, a partir de las cinco mediciones durante los primeros 30 segundos cuando el dedo índice se encuentra en la posición inicial θ° (horizontal) se obtiene un valor de amplitud media de la señal rectificadora de SEMG 2.4mV. Entre los 30 segundos y los 60 segundos cuando el dedo índice se mantiene en la posición de $\theta + 45^\circ$ se obtiene un valor medio de la amplitud de 3.3mV de rectificadora. Finalmente, cuando el índice se mantiene en la posición $\theta + 90^\circ$ (estirada) se obtiene un valor medio de la amplitud de 4.1mV rectificadora.

3.1 Dimensión fractal de la señal SEMG adquirida del dedo índice

Como un ejemplo de los métodos no lineales tomamos la dimensión fractal de Katz y el algoritmo de Higuchi en el dominio del tiempo. Es, de hecho, la dimensión fractal de la curva que representa la amplitud de la señal en cuestión en un plano como una función del tiempo. Por lo tanto, siempre es entre 1 y 2, sino que cada uno tiene una curva sencilla dimensión igual a 1 y un plano tiene dimensión es igual a 2. Se informó [13] que el algoritmo Katz produce los resultados más consistentes en términos de discriminación entre los estados cuando se aplica a las señales de EEG. Los autores también demostraron que el algoritmo de Katz enfatizó FDs más altas y es relativamente insensible al ruido. Esto nos lleva a pensar que el algoritmo de Katz es más eficiente que el de Higuchi en la detección de los cambios bruscos en la señal. Se utilizaron los algoritmos de la



dimensión fractal de Katz y Higuchi porque son algoritmos eficientes para la medición de la dimensión fractal de las secuencias de tiempo discretos.

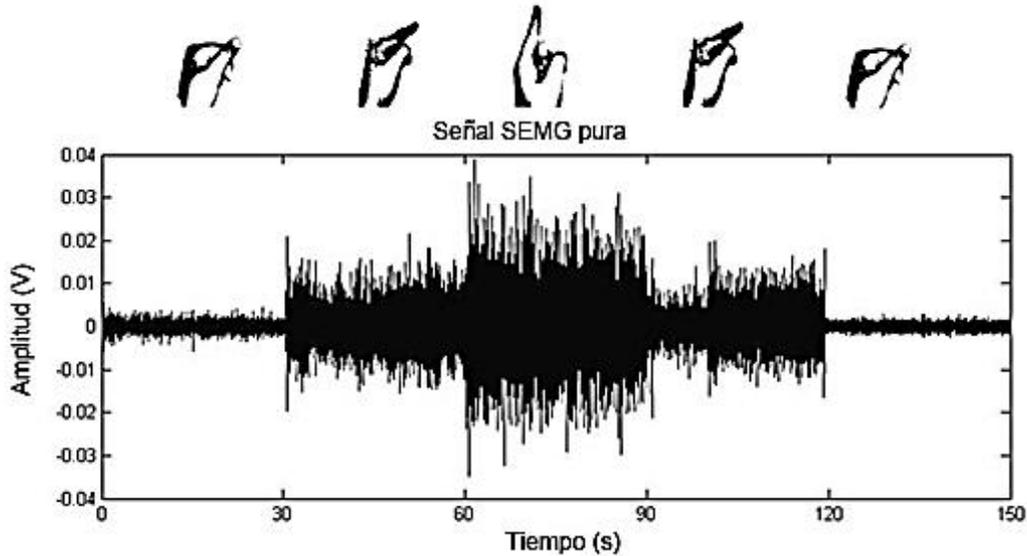


Figura 5. Señal SEMG adquirida del músculo EDC durante el ejercicio.

Tabla 2. Media y desviación estándar de la amplitud (v) de la señal SEMG en cinco mediciones de cada posición.

Medición	θ°		$\theta^\circ+45^\circ$		$\theta^\circ+90^\circ$	
	Media	σ	Media	σ	Media	σ
1 ^{ra}	0.0022	0.00038	0.0034	0.00019	0.0042	0.00012
2 ^{da}	0.0031	0.00042	0.0036	0.00021	0.0043	0.00011
3 ^{ra}	0.0021	0.00041	0.0031	0.00022	0.0041	0.0001
4 ^{ta}	0.0022	0.00039	0.0032	0.00019	0.004	0.00011
5 ^{ta}	0.0023	0.00038	0.0033	0.00019	0.0041	0.00011
Promedio	0.0024	0.000396	0.0033	0.0002	0.0041	0.00011

La transformación de la bioseñal original en dimensión fractal permite reducir la cantidad de datos sin perder información importante. Durante la adquisición de la señal SEMG a una frecuencia de 1 kHz se necesita un conjunto de 550 muestras de amplitud de la señal KFD y HFD en "tiempo real" durante toda la medición. En la figura 6 se observa la correlación que existe entre la señal SEMG adquirida del movimiento del dedo índice en el músculo EDC al igual que con la señal simulada lo que nos dice que la KFD es una buena opción para poder relacionar la amplitud de la señal con la dimensión fractal de ésta. La variación de la señal en amplitud SEMG se corresponde a los valores de KFD como un cambio relacionado con el aumento de la amplitud de la señal.

Como se ha observado tanto en el SEMG señal simulada y las cinco mediciones que fueron tomadas en el experimento cuando el dedo está en la posición inicial θ° , durante los primeros 30 segundos, el valor medio de la KFD es 1,000000001. Cuando los cambios de posición del dedo para $\theta + 45^\circ$ y se mantuvo allí durante 30 segundos, el valor medio es 1,0000001 KFD. Finalmente, cuando el dedo se coloca en la posición $\theta + 90^\circ$ durante los siguientes 30 segundos, el KFD tiene un valor medio de 1,0000003.



La correlación entre la amplitud de la KFD y la amplitud de la señal podría ser explicado por el enfoque de la estimación de la dimensión fractal Katz, que se ve directamente afectado por el número de muestras n , y en el caso de señales con un gran número de muestras, las KFD se ve afectada principalmente por la amplitud. Como se observa en la figura 7 no se puede observar una correlación directa entre la señal SEMG adquirida y la HFD en tiempo real. Ya se había visto en la literatura que el algoritmo de Katz produce resultados más consistentes [13] y parece que estos resultados los confirman como se puede observar en la tabla 3.

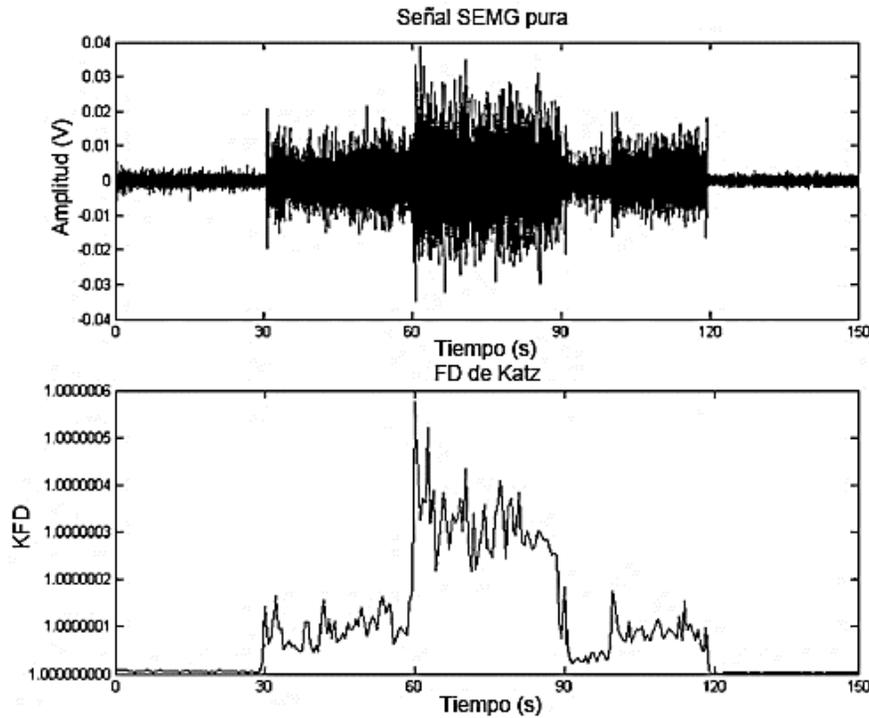


Figura 6. Señal SEMG adquirida durante el ejercicio (arriba) Valor de dimensión fractal procesado con el algoritmo de Katz (abajo)

3.1 Dimensión fractal de la señal SEMG utilizada para diferenciar entre dedos

Colocado en la misma posición que el ejercicio anterior en el músculo Extensor Digitorum Communis, se realiza un movimiento de extensión del dedo índice en un tiempo aproximado de 30 segundos manteniendo los demás dedos en reposo, luego se regresa a la posición de reposo; después se realiza el mismo movimiento de extensión pero con el dedo medio durante un tiempo aproximado de 30 segundos manteniendo los demás dedos en reposo. Este ejercicio se repite 4 veces para comprobar la relación. Se puede observar en las figuras 8 y 9 la diferencia tanto en amplitud como en KFD al mover el dedo índice (los primeros 35s) y al mover el dedo medio (siguientes 35s). También se observa la correlación entre las señales SEMG rectificadas y la KFD.

Tabla 3. Media de la amplitud y de la FD de Katz de la señal SEMG en cada posición.

Posición del dedo índice	Amplitud promedio	Promedio FD Higuchi	Promedio FD Katz	Tiempo que se mantuvo en posición
θ	0.004 V	1.878	1.00000002	0 – 30 seg
$\theta + 45$	0.003 V	1.861	1.00000015	30 – 60 seg
$\theta + 90$	0.002 V	1.863	1.00000035	60. – 90 seg

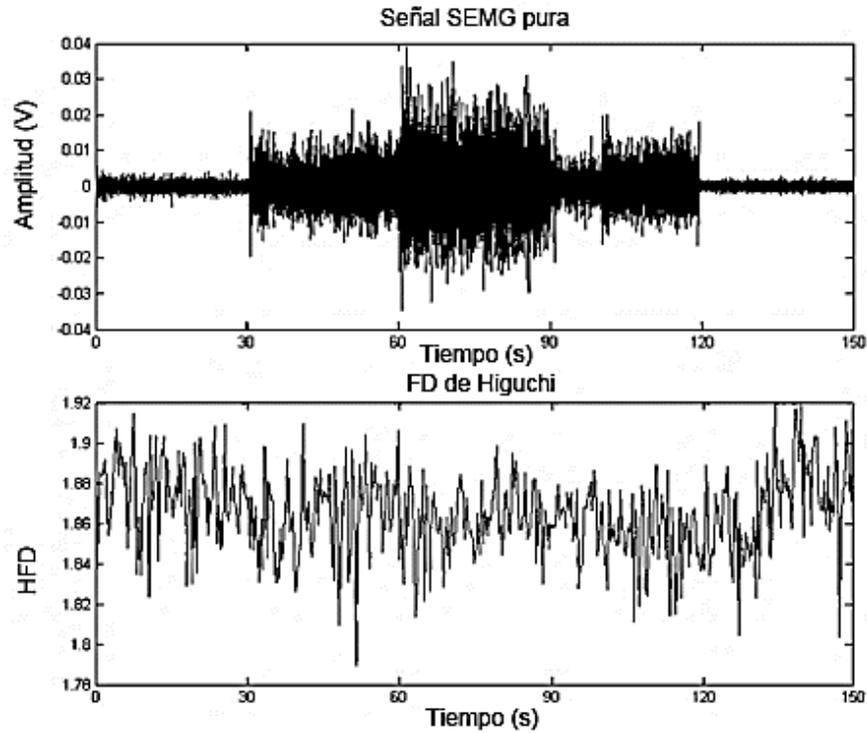


Figura 7. Señal SEMG adquirida durante el ejercicio (arriba) Valor de dimensión fractal procesado con el algoritmo de Higuchi (abajo).

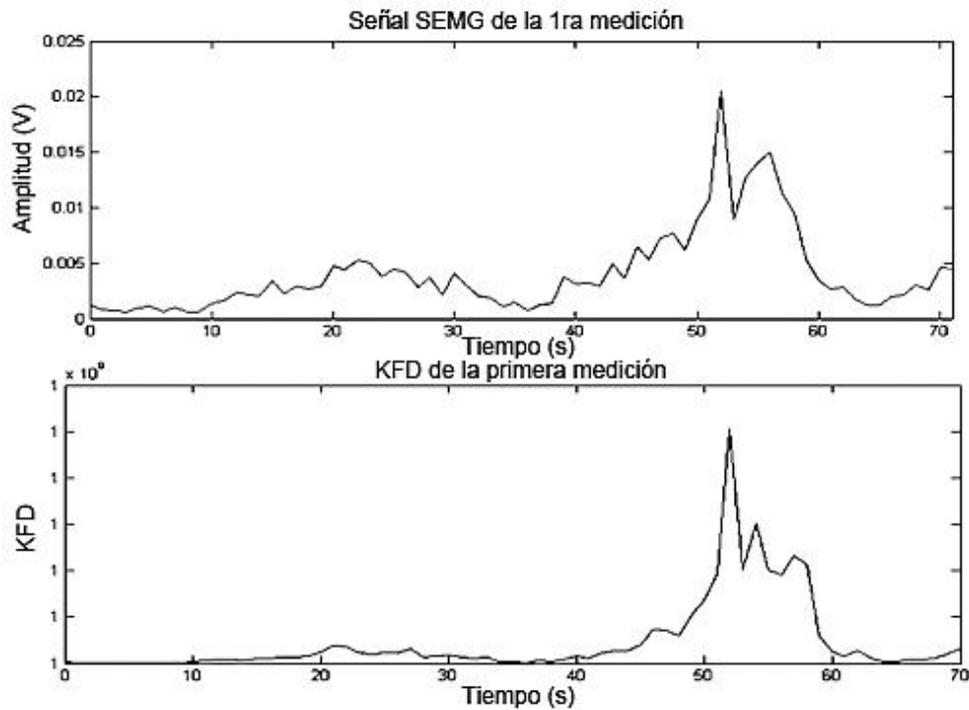


Figura 8. Comparación de la RMS de la Señal SEMG (arriba), junto con la KFD calculada con la misma Señal SEMG adquirida (abajo) en la primera medición.

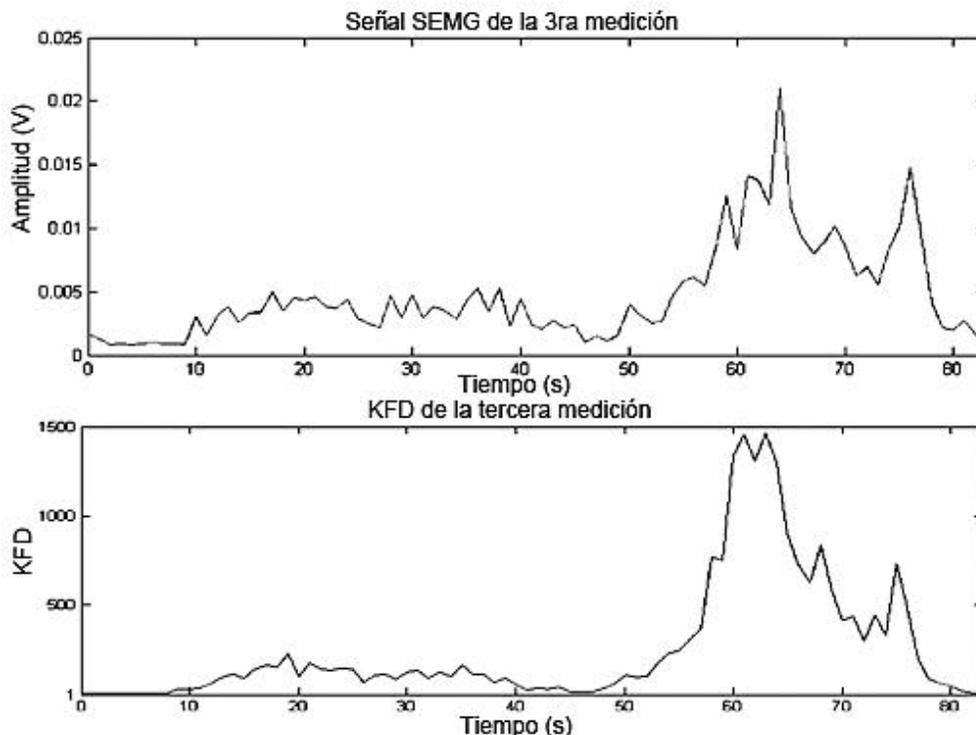


Figura 9. Comparación de la RMS de la Señal SEMG (arriba), junto con la KFD calculada con la misma Señal SEMG adquirida (abajo) en la tercera medición.

3.2 Dimensión fractal de la señal SEMG adquirida de un ejercicio de flexión y extensión del músculo biceps brachii

Colocando los electrodos en el músculo bíceps, se realizó el ejercicio de flexión y extensión del músculo. Llevando a cabo dos movimientos de flexión/extensión durante aproximadamente 15 segundos. La flexión se realizó estando la articulación del codo extendida a aproximadamente 135°. Cada movimiento de flexión/extensión tuvo una duración de aproximadamente 3.5 segundos. Para este experimento se realizaron 4 pruebas donde los resultados se muestran a continuación.

Tabla 4. Amplitud y KFD promedio de los movimientos de flexión/extensión del bíceps brachii.

Prueba	Amplitud Promedio durante la flexión/extensión (V)	KFD promedio durante la flexión/extensión
1	0.049	1.00004721
2	0.051	1.00005002
3	0.048	1.00004903
4	0.055	1.00005014

Tanto en la figura 10 como en la tabla 4 se puede observar como los valores de KFD guardan una relación con los valores de amplitud de la señal SEMG obtenidos de los movimientos de flexión/extensión del músculo biceps brachii. Lo que nos dice, al igual que los experimentos anteriores que los valores autosimilitud de la señal SEMG aumentan al aumentar la amplitud de la señal.

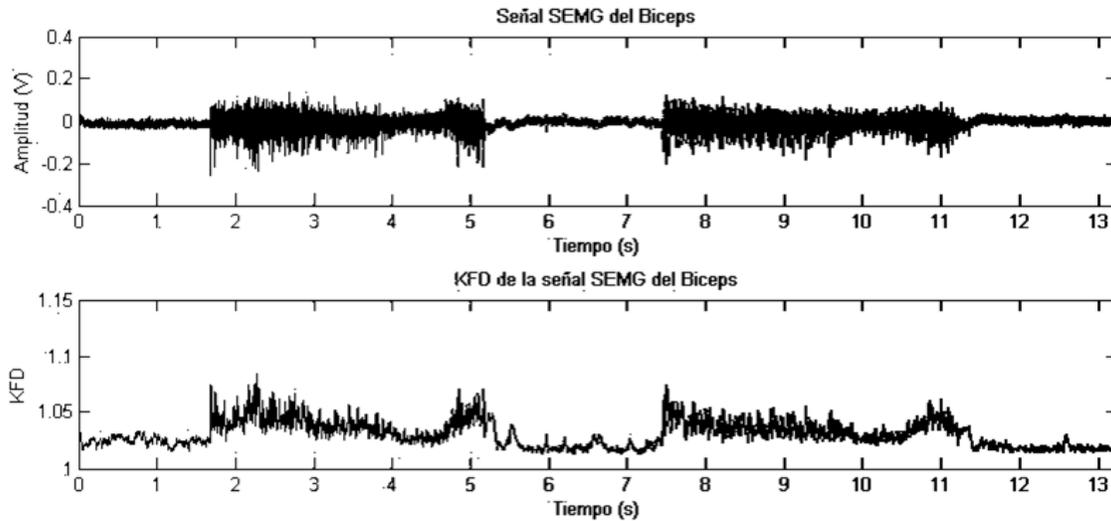


Figura 10. Señal SEMG obtenida del bíceps (arriba). FD de Katz calculada de la señal SEMG del bíceps

4. Conclusión

Esta investigación informa el uso de la teoría fractal para estimar el nivel y la fuente de la actividad muscular de flexión y extensión del dedo índice para determinar la posición del dedo correspondiente. Las dimensiones fractales ayudan a determinar la complejidad de la señal SEMG y el valor de la dimensión fractal representa una medida de la actividad muscular. Esta característica es útil para el análisis de los patrones de SEMG cuando hay varios músculos activos. Los resultados de los experimentos han probado la eficacia del algoritmo de dimensión fractal de Katz sobre el de Higuchi para identificar en tiempo real la amplitud de la actividad SEMG correspondiente a cada posición del dedo. También se pudo notar que existe una diferencia tanto de amplitud como de valores de dimensión fractal dependiendo de que dedo se mueva, lo que nos ayuda a diferenciar entre dedos con un solo par de electrodos colocados en el músculo extensor digitorum. Además se corroboró la correspondencia entre la amplitud de la señal SEMG y los valores de la dimensión fractal de Katz en movimientos de flexión/extensión del músculo bíceps brachii, lo que comprueba que el algoritmo funciona tanto en diferentes músculos como en diferentes ejercicios.

El fin de esta investigación, es el de desarrollar un control de posición efectivo para un brazo robótico utilizando solamente señales de electromiografía que pueda trabajar en tiempo real y no sea afectado por la fatiga muscular. Utilizando la relación entre los valores de KFD con la posición del dedo índice, se puede aplicar un método de ajuste de curvas para utilizar esos valores de KFD en un controlador de posición basado en la dimensión fractal de la señal SEMG para una mano robótica. Además el sistema es capaz de diferenciar la posición de cada uno de los dedos con un solo electrodo, si se le agregan más señales SEMG y KFD adquiridas de varios electrodos se podría hacer un control mucho más complejo al aplicar algoritmos de reconocimiento de patrones y por supuesto aplicarlo al movimiento de todo el brazo.

Referencias

- [1] García M., Catunda J., Lemos T., Oliveira L., Imbiriba L. y Souza M., "An alternative approach in muscle fatigue evaluation from the surface EMG signal", Conf. Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. Annu. Conf., vol. 2010, pp. 2419–22, Jan. 2010.
- [2] Koutsos E. y Georgiou P., "An analogue instantaneous median frequency tracker for EMG fatigue monitoring", 2014 IEEE Int. Symp. Circuits Syst., pp. 1388–1391, Jun. 2014.



- [3] Karjalainen P., "Nonlinear methods in EMG analysis", Biosignal Anal. Med. Imaging Gr., 2007.
- [4] Mandelbrot B., "The Fractal Geometry of Nature", New York, New York, USA: Freeman, 1983.
- [5] Arjunan S. y Kumar D., "Fractal theory based non-linear analysis of SEMG", 2007 3rd Int. Conf. Intell. Sensors, Sens. Networks Inf., pp. 545–548, 2007.
- [6] Basmajian J. y De Luca C., "Muscles Alive: Their Functions Revealed by Electromyography", 5th ed. Baltimore: MD: Williams & Wilkins, 1985.
- [7] Anmuth M. y Goldberg G., "Fractal dimension of electromyographic signals recorded with surface electrodes during isometric contractions is linearly correlated with muscle activation", Muscle and Nerve, 1994.
- [8] Gitter J. y Czerniecki M., "Fractal analysis of the electromyographic interference pattern.", J. Neurosci. Methods, vol. 58, no. 1–2, pp. 103–108, 1995.
- [9] Ehtiati T. y Kinsner W., "Multifractal characterization of electromyogram signals", Eng. Solut. Next Millenn. 1999 IEEE Can. Conf. Electr. Comput. Eng. (Cat. No.99TH8411), vol. 2, pp. 792–796, 1999.
- [10] Moritani T. y Muro M., "Applied Physiology Motor unit activity and surface electromyogram power spectrum during increasing force of contraction", Eur. J. Appl. Physiol., vol. 56, pp. 260–265, 1987.
- [11] Katz M., "Fractals and the analysis of waveforms", Comput. Biol. Med., vol. 18, no. 3, pp. 145–156, Jan. 1988.
- [12] Higuchi T., "Approach to an Irregular Time Series on the Basis of the Fractal Theory", Physica D, pp. 277–283, 1988.
- [13] Esteller R., Vachtsevanos G., Echaz J. y Litt B., "A Comparison of *waveform fractal dimension algorithms*", IEEE Trans. Circuits Syst. I Fundam. Theory Appl., vol. 48, no. 2, pp. 177–183, 2001.



Modelo cinemático inverso en velocidades de un manipulador móvil no-holónimo para la coordinación de movimientos

Martínez Sánchez Noé Alfredo¹, González Villela Víctor Javier¹, López Parra Marcelo², Peña Medina Erik¹

¹Universidad Nacional Autónoma de México, A.v Universidad #3000, Ciudad de México, C.P. 04510, México D.F.

²Universidad Nacional Autónoma de México Campus Juriquilla, Boulevard Juriquilla #3001, Querétaro México, C.P. 76230, México.

Resumen

En este trabajo se presenta el modelo cinemático inverso en velocidades de un manipulador móvil no-holónimo; utilizando la propagación de velocidades se obtienen por separado los Jacobianos de ambos robots, posteriormente en la cinemática directa se unen los Jacobianos, los cuales están relacionados por el vector de coordenadas articulares. El modelo cinemático inverso se genera a partir del modelo cinemático directo por medio del Jacobiano pseudo-inverso, el resultado es una expresión en la cual, dada una velocidad del efector final, se obtienen las velocidades de las juntas, este modelo sirve para lograr una coordinación de movimientos de todo el sistema. El modelo obtenido se verifica por medio de una simulación en donde se muestra que el manipulador móvil es coordinado con su modelo cinemático inverso en velocidades.

Palabras clave: Manipulador móvil, coordinación, Jacobiano.

1. Introducción

Un manipulador móvil es la unión de una base móvil y un manipulador, cada uno tiene características diferentes, el manipulador provee manipulación y la plataforma móvil provee movilidad. Los manipuladores móviles tienen capacidades que son clave en muchas aplicaciones de robótica, tales como: robots de exploración, robots domésticos, robots vigilantes [1-3].

Basado en el principio de que el manipulador móvil está compuesto de dos subsistemas físicos a menudo se asume que este sistema mecánico debe descomponerse y modelarse por separado [4-6]. En algunos casos la plataforma y el manipulador son coordinados de manera separada ignorando la interacción dinámica entre ellos. En otros casos el modelo cinemático es incompleto, considerando únicamente que existe una restricción no-holónica en la plataforma sin tomar en cuenta las restricciones holónicas [7]. En la coordinación de los robots manipuladores no-holónomos, existen diferentes dificultades: la naturaleza no-holónica de la plataforma, la cual restringe los caminos permisibles, y el hecho de ser un robot redundante. El tipo de coordinación a utilizar depende de las especificaciones de la tarea.

En [8], dado un camino para que sea seguido por el efector final, se planea un camino para la base de tal manera que es factible con respecto a la manipulabilidad. En [9], distribuyen el movimiento de la plataforma móvil y el manipulador de manera adaptativa, coordinando la plataforma y el manipulador para reducir al mínimo los errores de todo el manipulador móvil. En [10], proponen un enfoque para llevar al manipulador a una configuración preferida, esta debe de mantenerse



cuando la base móvil se mueve sobre una trayectoria, una vez que se llega a una posición final, el manipulador actúa saliendo de la configuración preferida para después volver a ella y así permitir que la base móvil se traslade a otro punto final. En [11] proponen un algoritmo que hace la coordinación de una plataforma móvil y un manipulador considerando la manipulabilidad de un objeto que es llevado en conjunto con un humano, utilizan la redundancia del robot, la coordinación la realizan por medio de un control de impedancia. En [12] realizan una coordinación de movimientos en un manipulador móvil omnidireccional, haciendo que la trayectoria del manipulador dependa de la distancia entre la base y la meta. Mediante una función de optimización encuentran la configuración de la plataforma para después encontrar con la cinemática inversa la postura del manipulador [13]. En [14] la planeación de movimientos es hecha por medio de una función de optimización, toman en cuenta las restricciones de la plataforma móvil y del manipulador.

En este trabajo se obtiene el modelo cinemático inverso de un manipulador móvil no-holónimo por medio del Jacobiano pseudo-inverso, para ello se hace uso de la técnica de propagación de velocidades, obteniendo los Jacobianos de ambos robots, posteriormente se relacionan los modelos. En el modelo se toman en cuenta las restricciones holonómicas y no-holonómicas. La determinación de este modelo cinemático inverso permite tener una función que ayude a la coordinación de movimientos de todo el robot y así evitar hacerlo por separado. En el apartado 2 se muestra el tipo de manipulador móvil utilizado, después se obtiene el modelo en velocidades de la cinemática directa, por último se realiza el modelo cinemático inverso el cual sirve para realizar la coordinación de movimientos. En el apartado 3 se realiza una simulación del modelo cinemático inverso para comprobar el modelo obtenido. Finalmente se muestran las conclusiones de este trabajo.

2. Cinemática del manipulador móvil

Con el fin de mostrar la coordinación del manipulador móvil primero se modela el robot. Se toman en cuenta las siguientes consideraciones: la plataforma móvil se mueve sobre una superficie plana, los eslabones del manipulador móvil son rígidos y se cumple la condición de rodadura.

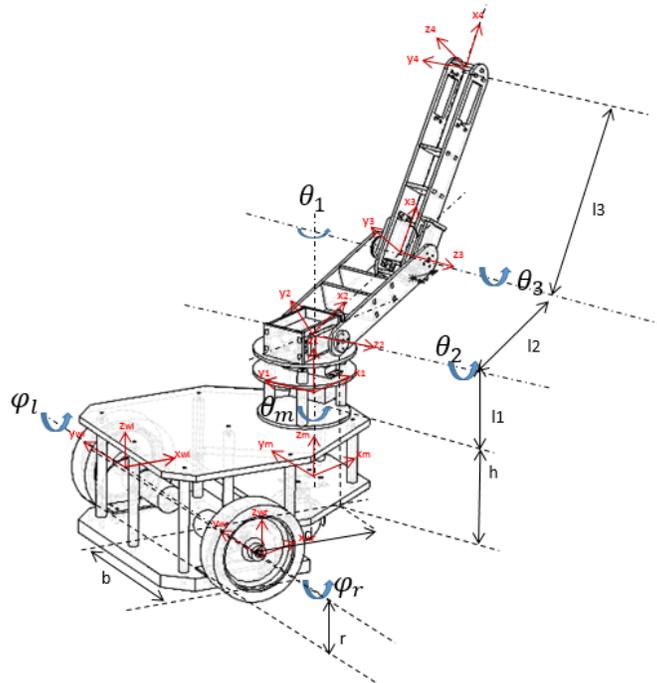


Figura 1. Manipulador móvil.

Las coordenadas generalizadas se separan en dos conjuntos $q = [q_m, q_a]^T$, donde $q_m \in R^m$ describe las coordenadas de la plataforma móvil, $q_a \in R^a$ describe las coordenadas del manipulador, las coordenadas generalizadas del manipulador móvil en velocidad vienen dadas por $\dot{q} = [\dot{x}_m, \dot{y}_m, \dot{\theta}, \dot{\phi}_r, \dot{\phi}_l, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3]^T$, donde \dot{x}_m y \dot{y}_m son la velocidad lineal de la plataforma móvil en cada eje, $\dot{\theta}$ la velocidad angular, $\dot{\phi}_r$ y $\dot{\phi}_l$ son las velocidades de las llantas derecha e izquierda respectivamente, $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$ y $\dot{\theta}_3$ son las velocidades angulares del manipulador. Los parámetros del manipulador móvil son: r radio de las llantas, d es la distancia sobre el eje x_m de la plataforma móvil al eje de las llantas, b es la distancia sobre el eje y_m a las llantas, h es la distancia medida del sistema de referencia (x_m, y_m, z_m) al sistema de referencia (x_1, y_1, z_1) sobre el eje z_m , l_1, l_2 y l_3 son las longitudes de los eslabones del manipulador. Para encontrar el modelo cinemático en velocidades del manipulador móvil, se utiliza la técnica de propagación de velocidades [15], ${}^{i+1}v_{i+1} = {}^{i+1}R({}^i v_i + {}^i \omega_i \times {}^i P_{i+1})$ para la velocidad lineal y ${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}R {}^i \omega_i + \dot{\theta}_{i+1} \hat{Z}_{i+1}$ para la velocidad angular. A continuación se realizaron dos propagaciones de velocidades, primero se propago la velocidad del sistema (x_m, y_m, z_m) hacia cada una de las llantas (x_{wr}, y_{wr}, z_{wr}) y (x_{wl}, y_{wl}, z_{wl}) , con esta propagación se encuentra el Jacobiano del robot móvil; segundo, se realizó una propagación de velocidades del sistema de referencia (x_m, y_m, z_m) al sistema de referencia (x_4, y_4, z_4) , con esta propagación se encuentra el Jacobiano del manipulador. Ambos Jacobianos están en función del vector de coordenadas generalizadas \dot{q} , los modelos aún están separados, en la siguiente sección se unen los Jacobianos.

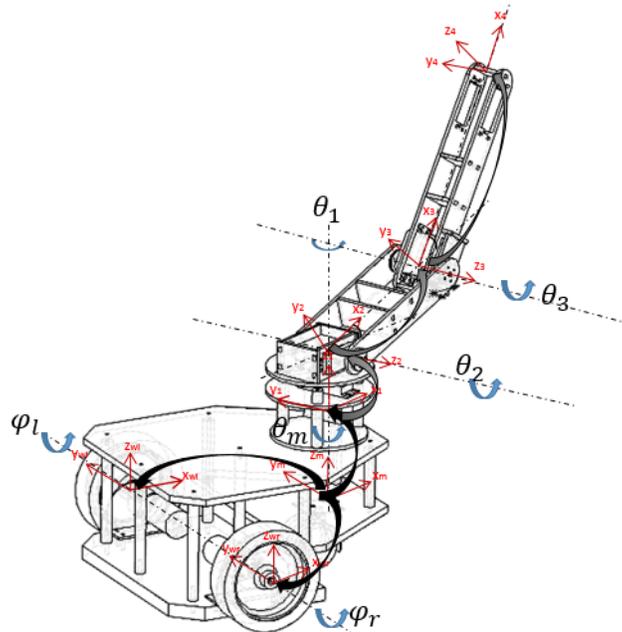


Figura 2. Propagación de velocidades en el manipulador móvil



2.1 Cinemática directa

La plataforma móvil es un robot del tipo (2,0), se sabe que este tipo de plataforma móvil posee restricciones no-holónomas [16]. Tomando en cuenta la primera propagación de velocidades, podemos describir las restricciones en la forma $A(q)\dot{q} = 0$, donde:

$$A(q)\dot{q} = \begin{pmatrix} -\sin(\theta) & \cos(\theta) & -d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & -d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos(\theta) & \sin(\theta) & b & -r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos(\theta) & \sin(\theta) & -b & 0 & -r & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{y}_m \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi}_r \\ \dot{\phi}_l \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Se observa que la matriz Jacobiana $A(q)$ contiene únicamente coeficientes del robot móvil, también que el modelo cinemático está en función del vector \dot{q} . El modelo cinemático en el espacio de estados de la ec. (1) puede representarse como: $\dot{q} = S(q)u$, donde $S(q)$ es el espacio nulo de $A(q)$, $u(t) = [v_1, v_2, \dot{q}_a]^T$ donde $v_1 = \dot{x}_m$ y $v_2 = \dot{\theta}$.

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{y}_m \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi}_r \\ \dot{\phi}_l \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -d \sin(\theta) & 0 & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & d \cos(\theta) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1/r & b/r & 0 & 0 & 0 \\ 1/r & -b/r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{\theta} \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Para formar el Jacobiano del manipulador se calcula la propagación de velocidades, comenzando en el sistema de referencia (x_m, y_m, z_m) y tomando en cuenta que se tiene una velocidad: ${}^0\omega_0 = {}^m\omega_m = (0, 0, \dot{\theta})^T$ correspondiente a la velocidad de giro de la plataforma móvil y ${}^0v_0 = {}^mv_m = (\dot{x}_m, \dot{y}_m, 0)^T$ correspondiente a la velocidad lineal de la plataforma móvil. De la Fig. 2 y de la propagación de velocidades, se obtiene el Jacobiano del manipulador montado sobre una base móvil:



$$J(q) = \begin{pmatrix} c_\theta & s_\theta & -\sigma_1 s_{\theta_1} & 0 & 0 & -\sigma_1 s_{\theta_1} & -c_{\theta_1}(l_3 s_{\theta_2+\theta_3} + l_2 s_{\theta_2}) & -l_3 s_{\theta_2+\theta_3} c_{\theta_1} \\ -s_\theta & c_\theta & \sigma_1 c_{\theta_1} & 0 & 0 & \sigma_1 c_{\theta_1} & \frac{l_3 c_{\theta_1+\theta_2+\theta_3}}{2} - \frac{l_2 c_{\theta_1-\theta_2}}{2} - \frac{l_3 c_{\theta_1-\theta_2-\theta_3}}{2} + \frac{l_2 c_{\theta_1+\theta_2}}{2} & \frac{l_3 c_{\theta_1+\theta_2+\theta_3}}{2} - \frac{l_3 c_{\theta_2-\theta_1+\theta_3}}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_1 & l_3 c_{\theta_2+\theta_3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{\theta_1} & s_{\theta_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_{\theta_1} & -c_{\theta_1} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

donde $\sigma_1 = l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_2 \cos(\theta_2)$, entonces las velocidades del efector final vienen expresadas por la ecuación:

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (3)$$

Donde $\dot{X} = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma}]^T$ son las velocidades del efector final expresadas en el marco inercial. Para unir los modelos cinemáticos de ambos robots se sustituye la ec. (2) en (3), quedando:

$$\dot{X} = J(q)S(q)u \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\dot{x}_m \cos(\theta_1 - \theta_2 - \theta_3)}{2} + \frac{c_{123} \dot{x}_m}{2} + \frac{d s_{123} \dot{\theta}}{2} + l_2 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_3) + \frac{d \dot{\theta} \sin(\theta_1 - \theta_2 - \theta_3)}{2} \\ c_{23} l_3 \dot{\theta} - \dot{x}_m \sin(\theta_1) + c_{23} l_3 \dot{\theta}_1 + d \dot{\theta} \cos(\theta_1) + l_2 \dot{\theta} \cos(\theta_1) + l_2 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) \\ \frac{\dot{x}_m \sin(\theta_1 - \theta_2 - \theta_3)}{2} + l_3 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) - \frac{s_{123} \dot{x}_m}{2} + \frac{d c_{123} \dot{\theta}}{2} + l_2 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_3) - \frac{d \dot{\theta} \cos(\theta_1 - \theta_2 - \theta_3)}{2} \\ s_{23} (\dot{\theta} + \dot{\theta}_1) \\ -\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3 \\ c_{23} (\dot{\theta} + \dot{\theta}_1) \end{pmatrix}$$

donde: $c_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$, $s_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3)$, $c_{123} = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$ y $s_{123} = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$.

La ecuación anterior describe la relación de las velocidades del efector final en términos de las velocidades de las juntas, en este momento se tienen los dos modelos de los robots unidos. Además con estas ecuaciones ya es posible calcular el modelo dinámico, en donde la dinámica de ambos robots estará acoplada por la relación de velocidades.

2.2 Cinemática inversa

El problema de la cinemática inversa consiste en obtener las velocidades del espacio de juntas \dot{q} una vez definidas las velocidades del espacio cartesiano \dot{X} . Partiendo de la ec. (3) se escribe así:

$$\dot{X} = J(q)_i u \quad (5)$$

con $J_i(q) = J(q)S(q)$, para despejar el vector u , se multiplica (5) por $J(q)_i^T$

$$J(q)_i^T \dot{X} = J(q)_i^T J(q)_i u$$

$$u = [J(q)_i^T J(q)_i]^{-1} J(q)_i^T \dot{X}$$

$$J^\dagger = [J(q)_i^T J(q)_i]^{-1} J(q)_i^T$$

$$u = J^\dagger \dot{X} \tag{6}$$

Donde J^\dagger es el Jacobiano pseudo-inverso [17], la ec. (6) permite encontrar las velocidades de las juntas cuando se da una velocidad del efector final. El problema de coordinación del robot manipulador móvil puede enunciarse de la siguiente manera: dada una velocidad en el efector final \dot{X} cual es la correspondiente velocidad en el espacio de juntas \dot{q} que satisfacen esta velocidad de entrada. Esto ya se puede lograr con la ec. 6.

3. Simulación

Con el fin de verificar la ec. (6), se realiza una simulación, los parámetros del manipulador móvil son: $d = 0.2m$, $b = 0.12m$, $r = 0.05m$, $h = 0.15m$, $l_1 = 0.05m$, $l_2 = 0.25m$, $l_3 = 0.25m$. La velocidad de entrada para el efector final es: $\dot{x} = 0.2m/s$, $\dot{y} = 0.05m/s$, $\dot{z} = 0.5 * \sin(t) rad/s$, $\dot{\alpha} = 0 rad/s$, $\dot{\beta} = 0 rad/s$, $\dot{\gamma} = 0.2 rad/s$. En el apéndice A se muestra el diagrama de bloques que se realizó para la simulación.

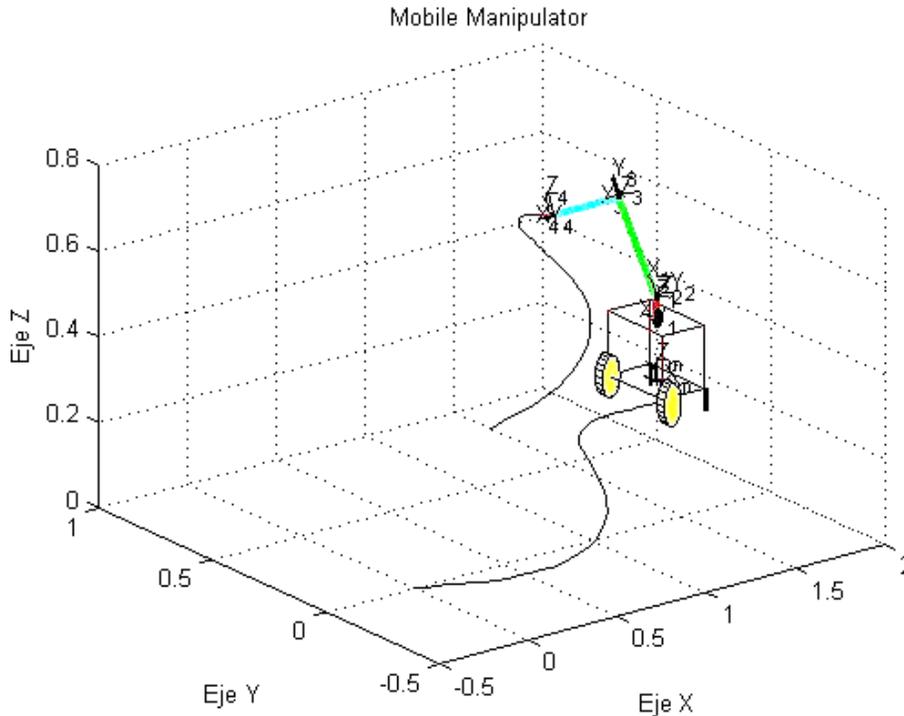


Figura 3. Trayectoria del manipulador móvil.

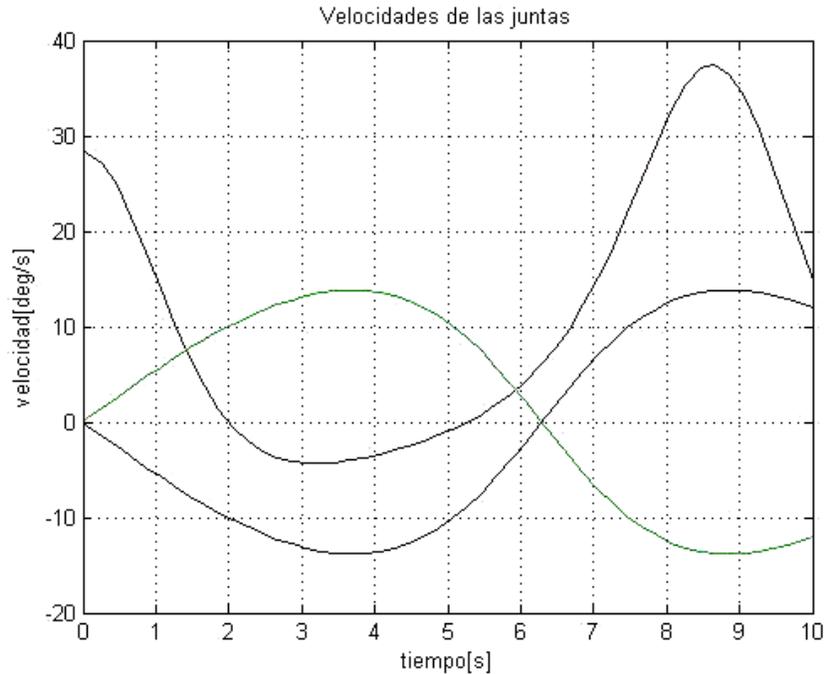


Figura 4. Velocidades de las juntas

En la Fig. 3 se muestra la trayectoria seguida por el manipulador móvil, en color azul la trayectoria en el plano que siguió la plataforma móvil y en color rojo la trayectoria que siguió el efector final del manipulador móvil. En la Fig. 4 se muestran las velocidades que siguieron los ángulos $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3$. En la Fig. 5 se muestran las velocidades de las llantas y en la Fig. 6 se muestran las posiciones angulares de las juntas $\theta, \theta_1, \theta_2, \theta_3$. El modelo cinemático obtenido por el Jacobiano pseudo-inverso es probado en esta simulación, se aprecia que, para un vector de velocidades \dot{X} se obtienen las velocidades del espacio articular \dot{q} . La coordinación de movimientos de un manipulador móvil se da cuando el robot es conducido a través de una trayectoria coordinando los movimientos de ambos robots, en este trabajo la ec. (6) permite hacer esta coordinación sin considerar al manipulador móvil como dos robots, además este enfoque acopla el modelo dinámico considerando todo el sistema como un solo robot. Esto último permitirá ver los efectos dinámicos del robot móvil sobre el manipulador.

4. Resultados

En este trabajo se ha obtenido con la propagación de velocidades el Jacobiano del robot móvil y el Jacobiano del manipulador en función del vector \dot{q} , esto permitió obtener la ecuación de cinemática directa que une los dos modelos. Con esto se tiene una relación de las velocidades que se dan en el efector final en función de las velocidades de las juntas. Con la propagación de velocidades es posible considerar los dos robots como uno solo, así en términos dinámicos también los dos robots están acoplados, debido a que una velocidad proporcionada por el robot móvil tendrá su influencia en el manipulador, esto permitirá obtener el modelo dinámico de todo el sistema como si se tratara de un solo robot.

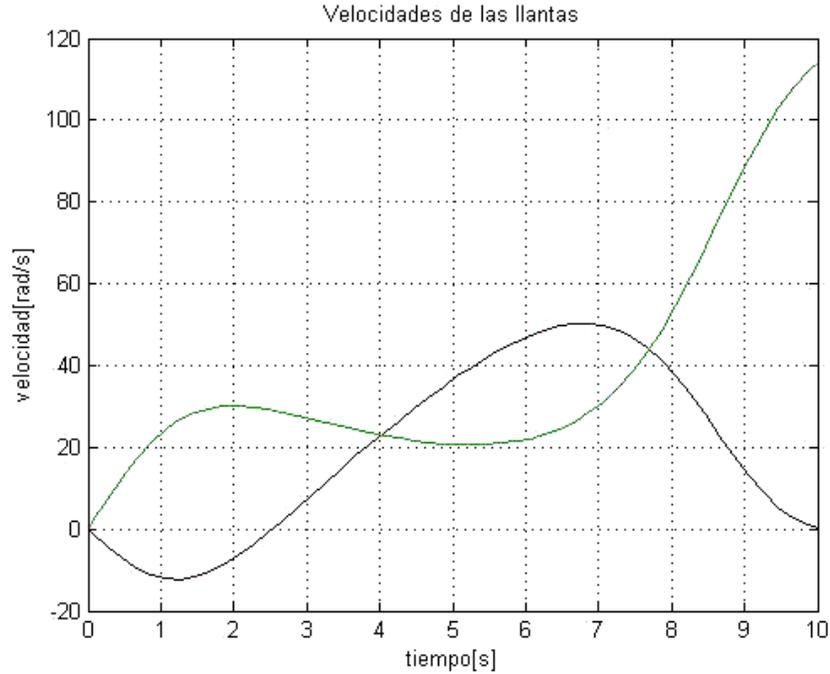


Figura 5. Velocidades de las llantas.

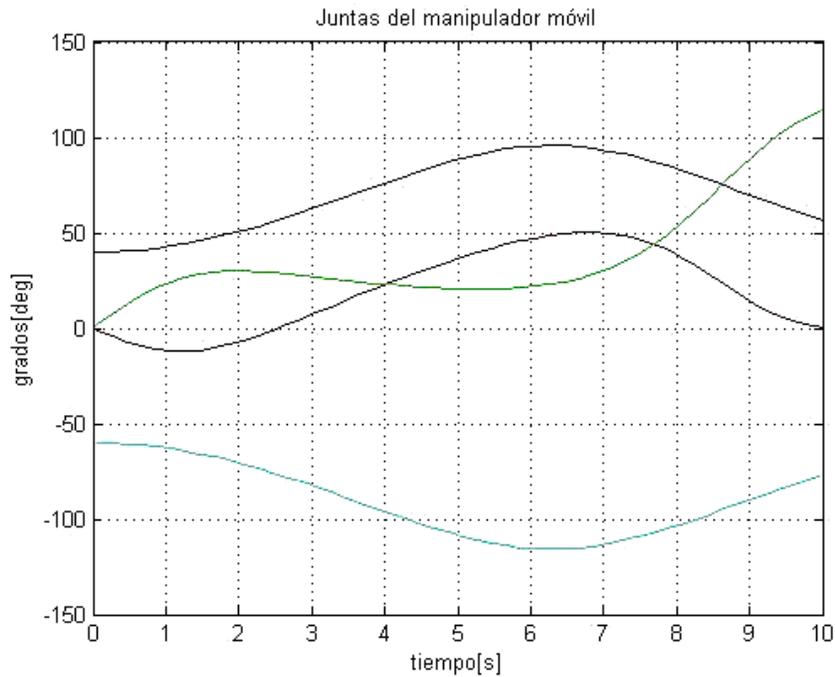


Figura 6. Posiciones de las juntas

También se ha presentado el modelo cinemático inverso en velocidades de un manipulador móvil no-holónimo por medio del Jacobiano pseudo-inverso partiendo del modelo cinemático directo. El modelo cinemático inverso del manipulador móvil, tiene como ventaja la coordinación de movimientos de ambos robots, esto permite dar como parámetros de entrada las velocidades del efector final \dot{X} y calcular las velocidades de las juntas \dot{q} que satisfacen la velocidad del efector



final. Con este enfoque se habla del manipulador móvil como un solo robot y permite que las tareas sean especificadas dando solamente las velocidades del efector final y no tratando el problema por separado, con esto la coordinación se logra de una forma sencilla. Además, con este enfoque de unión de los modelos cinemáticos en velocidad será posible coordinar no solo robots manipuladores móviles, sino también robots híbridos y derivar su modelo dinámico. El modelo cinemático inverso tiene una limitación, al ser el manipulador móvil redundante, existen diferentes soluciones o velocidades del vector de coordenadas articulares que cumplen las velocidades del efector final. Queda pendiente como trabajo futuro observar la dinámica del manipulador móvil cuando se da una coordinación como la presentada en este trabajo.

Anexos

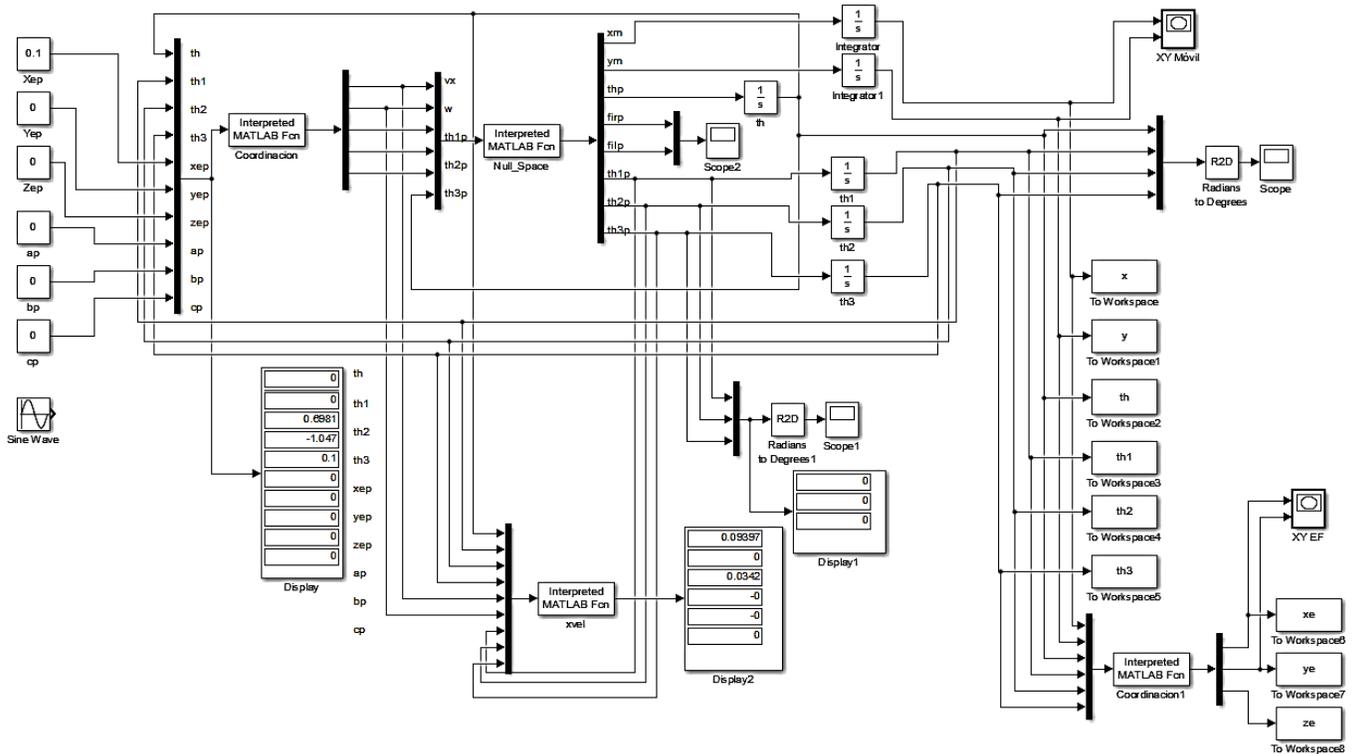


Figura 5. Diagrama de bloques Simulink.

Agradecimientos

Agradezco en lo que corresponde a la DGAPA, por el apoyo brindado para la realización de este trabajo, a través del proyecto UNAM-DGAPA-PAPIIT IN117614: "Robótica intuitiva, adaptable, reactiva, híbrida y móvil aplicada al servicio, el rescate y la medicina". Así también, se extiende un agradecimiento al programa de becas de CONACYT por el apoyo económico que permitió dirigir la atención directamente a la realización de este proyecto.

Referencias

- [1] J. Lurz and E. Drumwright, "Reducing human fall injuries using a mobile manipulator," in *Humanoid Robots (Humanoids), 2015 IEEE-RAS 15th International Conference on*, 2015, pp. 504-511.



- [2] K. F. Kong and Y. Li, "Mobile manipulator control based on voice and visual signal," in *32nd Chinese Control Conference, CCC 2013, July 26, 2013 - July 28, 2013*, Xi'an, China, 2013, pp. 4286-4291.
- [3] A. Meddahi and R. Chellali, "Adaptive and safe mobile manipulator for human robot interaction," in *2013 IEEE Workshop on Robotic Intelligence in Informationally Structured Space, RiSS 2013 - 2013 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, SSCI 2013, April 16, 2013 - April 19, 2013*, Singapore, Singapore, 2013, pp. 30-37.
- [4] P. C. Ávila, "Espacios Inteligentes con Manipuladores Móviles Dotados de Intuición Artificial," *Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México*, 2015.
- [5] E. D. Malagón, "Robot Móvil Omnidireccional Redundante: Modelado, Control e Implementación," *Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México*, 2015.
- [6] I. C. C. López, "Manipulador Móvil Omnidireccional Redundante: Coordinación de Movimientos en Ambientes Inteligentes," *Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México*, 2015.
- [7] R. Yuwei and W. Hong, "Mobile manipulator tracking control based on observer design," in *Intelligent Control and Automation (WCICA), 2010 8th World Congress on*, 2010, pp. 849-854.
- [8] N. Egerstedt and H. Xiaoming, "Coordinated trajectory following for mobile manipulation," in *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on*, 2000, pp. 3479-3484 vol.4.
- [9] J. Yunyi, X. Ning, C. Yu, and L. Siyang, "Coordinated motion control of a nonholonomic mobile manipulator for accurate motion tracking," in *Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), 2014 IEEE/RSJ International Conference on*, 2014, pp. 1635-1640.
- [10] Y. Yamamoto and X. Yun, "Coordinating locomotion and manipulation of a mobile manipulator," in *Decision and Control, 1992., Proceedings of the 31st IEEE Conference on*, 1992, pp. 2643-2648 vol.3.
- [11] M. Sato and K. Kosuge, "Handling of object by mobile manipulator in cooperation with human using object trajectory following method," in *Intelligent Robots and Systems, 2000. (IROS 2000). Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on*, 2000, pp. 541-546 vol.1.
- [12] I. Hernandez Calderon, "Manipulador móvil omnidireccional, su coordinación de movimientos en ambientes inteligentes," *Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México*, 2016.
- [13] G. Foulon, J. Y. Fourquet, and M. Renaud, "Coordinating mobility and manipulation using nonholonomic mobile manipulators," *Control Engineering Practice*, vol. 7, pp. 391-399, 1999.
- [14] A. Mohri, S. Furuno, and M. Yamamoto, "Trajectory planning of mobile manipulator with end-effector's specified path," in *Intelligent Robots and Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE/RSJ International Conference on*, 2001, pp. 2264-2269 vol.4.
- [15] J. J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics & Control*: Addison-Wesley Publ., 1986.
- [16] G. Campion, G. Bastin, and B. Dandrea-Novel, "Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 12, pp. 47-62, 1996.
- [17] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo, *Robotics: Modelling, Planning and Control*: Springer London, 2010.



Obtención de función de transferencia de un motor sin escobillas de corriente directa

Moreno Guzmán Martín¹, Hernández Zavala Antonio¹, Domínguez López Ivan².

¹ Instituto Politécnico Nacional, CICATA-QRO, Departamento de Mecatrónica, 76090, Querétaro, Querétaro, México.

² Instituto Politécnico Nacional, CICATA-QRO, Departamento de Mecatrónica, 76090, Querétaro, Querétaro, México.

Resumen

En este artículo se muestran el proceso de como obtener la función de transferencia de un motor sin escobillas por medio de la técnica de mínimos cuadrados. El motor sin escobillas necesita un controlador que pueda hacer girar el rotor de manera permanente, los autores diseñaron y fabricaron el controlador para el motor sin escobillas. Para obtener la función de transferencia de manera experimental se aplicó mínimos cuadrados con una entrada escalón y se observa la curva de respuesta.

Palabras clave: Motor sin escobillas, función de transferencia, mínimos cuadrados, control.

1. Introducción

La demanda de maquinas eléctricas de corriente continua que sean mas eficientes, mayores velocidades y alto desempeño provoco que se crearan maquinas eléctricas como los motores sin escobillas, los motores sin escobillas tienen mayores ventajas sobre los demás motores eléctricos son: mejor relación velocidad-par motor, mayor respuesta dinámica, mayor eficiencia, mayor vida útil, menor ruido electromagnético y mayor rango de velocidad.

Existen distintas metodologías para obtener la función de transferencia de un motor sin escobillas de manera experimental, la metodología que se muestra en este artículo es por medio de mínimos cuadrados. [1] En la siguiente sección se introducirá a los motores sin escobillas, a la configuración del inversor y se muestra el modelo matemático del motor sin escobillas.

La tercera sección abarca métodos de optimización de parámetros y criterios para utilizar los datos experimentales. En la cuarta sección se habla del método de mínimos cuadrados se describen las ecuaciones que se necesitan implementar para obtener el modelo. En la quinta sección se muestran los resultados que se obtuvieron de manera experimental, la función de transferencia del sistema y el comportamiento matemático al error mínimo.

2. Motor sin escobillas

La estructura básicas del motor sin escobillas se compone de imanes permanentes en el rotor y devanados en el estator. El motor sin escobillas necesita un inversor para que pueda girar el rotor. A este giro del rotor se conoce como conmutación[2].



La conmutación de un motor sin escobillas se basa en la atracción o repulsión entre polos magnéticos.[5] La conmutación comienza cuando la corriente pasa a través de los devanados, los polos magnéticos se repelen y genera el movimiento permanente del rotor.[6]

La generación del movimiento en un motor sin escobillas es necesario realizarlo electrónicamente. Consiste en determinar la posición del rotor utilizando algún tipo de sensor como retroalimentación, como consecuencia se conocerá a través de que devanados debe de pasar la corriente. El estator trabaja en conjunto con los imanes permanentes del rotor para generar un flujo magnético uniforme en el entre hierro[3].

2.1 Configuración de inversor

El motor sin escobillas necesita tres sensores de efecto Hall para detectar la posición del rotor. Basándose en la posición física de los sensores sobre el rotor, existirán dos tipos de salidas: una cuando se encuentre un deslizamiento a 60° y la otra a 120°. La combinación de los tres sensores de efecto Hall se puede determinar la secuencia de conmutación del motor sin escobillas.

La figura 1, Muestra el circuito equivalente. Cada fase del motor tiene un determinado valor de inductancia, resistencia, fuerza electromotriz de retorno (back-EFM). Este es conectado a un inversor. Un inversor consiste en seis transistores de potencia (M1, M2, M3, M4, M5 y M6), la configuración que forman es una estructura de medio puente.

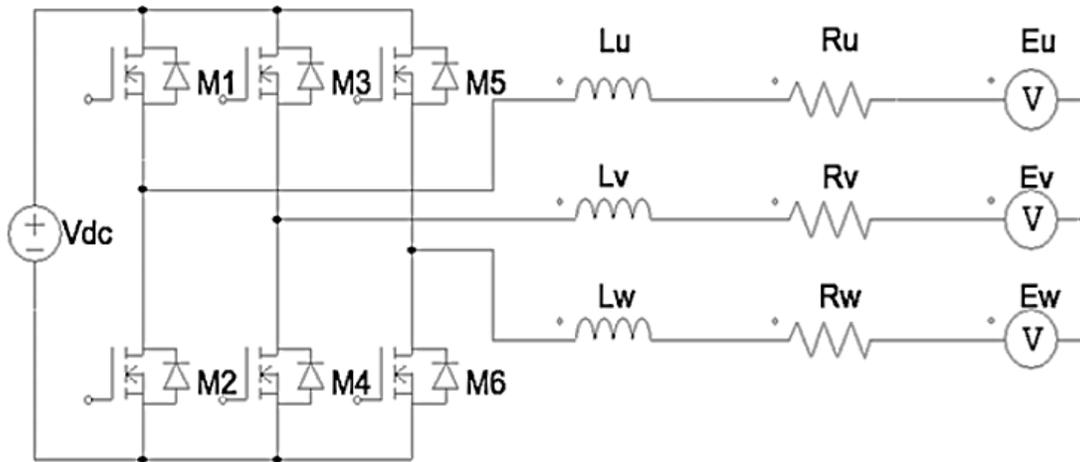


Figura 1. Circuito equivalente del motor sin escobillas

Para modelar este sistema, suponemos que las inductancias, resistencias y el back-EFM son constantes. El voltaje y la corriente fluye a través de dos fases y la tercera fase queda flotada. La ecuación 1 es el modelo del motor sin escobillas y dando el voltaje por cada par de fases.

Donde V_{uv} , V_{vw} y V_{wu} son los voltajes por cada par de fases; L_u , L_v y L_w son las inductancia de cada fase; E_u , E_v y E_w son los back-EFM de cada fase. i_u , i_v y i_w son las corrientes de cada fase.

$$\begin{bmatrix} V_{uv} \\ V_{uw} \\ V_{wu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_u & -R_v & 0 \\ 0 & R_v & -R_w \\ -R_u & 0 & R_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_u - L_v & L_v - L_u & 0 \\ 0 & L_v - L_w & L_w - L_v \\ L_u - L_w & 0 & L_w - L_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_u - E_v \\ E_v - E_w \\ E_w - E_u \end{bmatrix} \quad (1)$$



2.2 Secuencia de conmutación de un motor sin escobillas

Existen diferentes técnicas para la conmutación de un motor sin escobillas, depende de que tipo de sensores se utilicen como retroalimentación. [7] Las técnicas de conmutación mas conocidas son tres: conmutación de seis pasos, conmutación sinusoidal y la conmutación por efecto de campo. Solamente se abordará la conmutación de seis pasos[4].

2.2.3 Conmutación de seis pasos

La conmutación de seis pasos utiliza los tres sensores Hall embebidos en el motor, estos se encuentran separados a 120°, cada rotación de 60° los sensores de efecto Hall cambian su estado de 0 a 1 o viceversa. El cambio de estado lógico de los sensores genera una secuencia en dirección a favor del reloj y otra secuencia en contra del reloj[6].

La tabla 1 indica como es la conmutación de seis pasos, la posición del roto esta dado por *Hall U*, *Hall V* y *Hall W*. Los sensores de efecto Hall provee un valor determinado para accionar la compuerta del transistor del Mosfet será accionado. Con esta secuencia genera el constante movimiento del rotor.

Tabla 1. Secuencia de seis pasos para un motor sin escobillas

Hall U	Hall V	Hall W	M1	M2	M3	M4	M5	M6
1	0	0	1	0	0	0	0	1
1	1	0	0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	1	0	0	0
0	1	1	0	1	0	0	1	0
0	0	1	0	0	0	1	1	0
0	1	1	1	0	0	1	0	0

2.3 Sistema del motor sin escobillas

El diagrama de bloques del motor sin escobillas se muestra en la figura 2. El sistema se muestra un bloque de inversor que realiza la conmutación de seis pasos gracias al lazo de retroalimentación. El motor tiene dos tipos de retroalimentación.

La primera retroalimentación pertenece al bloque de sensores de efecto Hall, la segunda retroalimentación es bloque del encoder incremental. I_s es la entrada escalón del sistema y O_{vel} es la frecuencia del encoder que se conectará a un microcontrolador ATmega328 para conocer la velocidad del motor sin escobillas. El sistema se encuentra en lazo abierto debido a que se necesita conocer el comportamiento del sistema cuando se ingresa una entrada escalón.

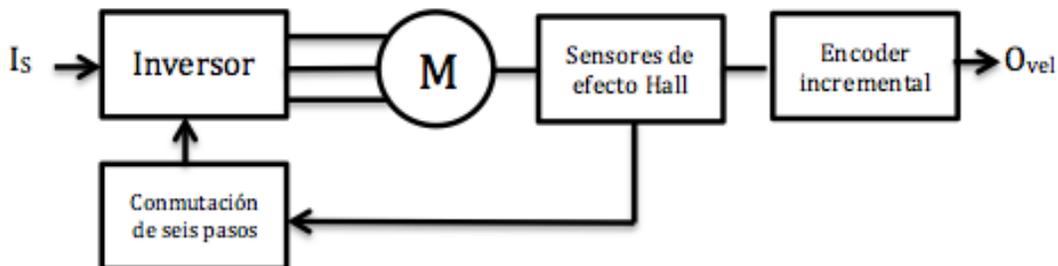


Figura 2. Diagrama de bloques del motor sin escobillas.



3. Método de estimación de parámetros

Resolver el problema de estimación de parámetros requiere lo siguiente:

- Datos de entrada-salida del proceso.
- Una clase de modelos.
- Un criterio.

La estimación de parámetros se formula como un problema de optimización, en el que el mejor modelo matemático es aquel que mejor se ajuste a los datos de acuerdo a un criterio dado.

3.1 Criterios

Cuando se plantea un problema de identificación se introduce algún criterio para tener una medida que se ajuste a los datos experimentales. El criterio se puede postular mediante hipótesis estadísticas se pueden deducir criterio de base probabilística, que se expresan de la forma:

$$\varepsilon = y - \hat{y} \quad (2)$$

$$\hat{y} = \phi\theta \quad (3)$$

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^N g(\varepsilon(k)) \quad (4)$$

donde ε es el error de entrada, y ε es el error de salida o un error generalizado.

4. El principio de mínimos cuadrados

El método de mínimo cuadrados se pueden emplear para la identificación en sistemas dinámicos. El problema general de los mínimos cuadrados se propone una variable calculada \hat{y} , en terminología de Gauss se representa en la siguiente ecuación:

$$\hat{y} = \theta_1\varphi_1(x) + \theta_2\varphi_2(x) + \dots + \theta_n\varphi_n(x) \quad (5)$$

Donde $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ son funciones conocidas y $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ son parámetros desconocidos. Mediante un experimento se obtiene de observaciones $\{(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, N\}$. El problema es determinar los parámetros de tal forma que las variables \hat{y}_i calculadas mediante la ecuación 5 y los valores experimentales x_i coincidan lo mas posible con las variable medidas y_i . Suponiendo que todas las medidas tienen la misma precisión, el principio de mínimos cuadrados dice que los parámetros se deben elegir de tal forma que la función es

$$J(\theta) = \frac{1}{2} \varepsilon^T \varepsilon = \frac{1}{2} \|\varepsilon\|^2 \quad (6)$$

$$\hat{y} = \phi\theta \quad (7)$$

Se tiene que determinar θ de tal forma que ε^2 sea mínimo. Las ecuaciones de estimación propuestas en este método son:

$$\hat{\theta}(N+1) = \hat{\theta}(N) + K(N)[y(N+1) - \varphi(N+1)\hat{\theta}(N)] \quad (8)$$

$$K(N) = P(N+1)\varphi^T(N+1) \quad (9)$$

$$K(N) = P(N)\varphi^T(N+1)[1 + \varphi(N+1)P(N)\varphi^T(N+1)] \quad (10)$$

$$P(N+1) = [1 - K(N)\varphi(N+1)]P(N) \quad (11)$$

La matriz P es la matriz de covarianza y se inicializa con un valor grande y va disminuyendo en la medida en que se lleva a cabo la estimación. La matriz K es la matriz de ganancias, relacionada con la velocidad de convergencia de la estimación.



5. Resultados

Para obtener los datos experimentales se implementó una entrada escalón donde un ancho pulso al 50% al motor sin escobillas, se obtiene la siguiente respuesta que se muestra en la figura 3.

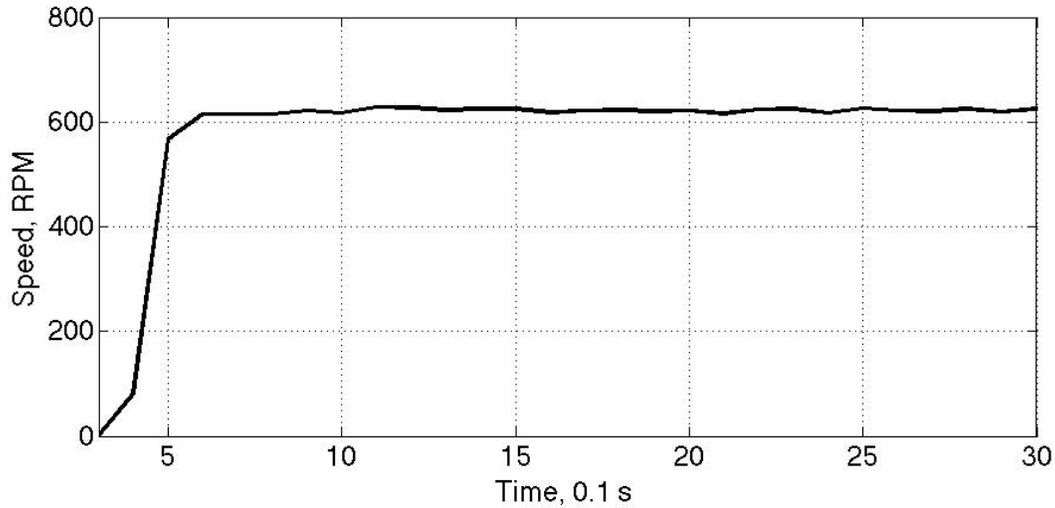


Figura 3. Entrada escalón en lazo abierto

Al implementar del método de mínimos cuadrados se obtiene la función de transferencia de primer orden del sistema dando como resultado la ecuación 12 y la figura 4 muestra la curva de aproximación por medio de mínimos cuadrados.

$$G(s) = \frac{12.7701278}{3.87253474s+1} \quad (12)$$

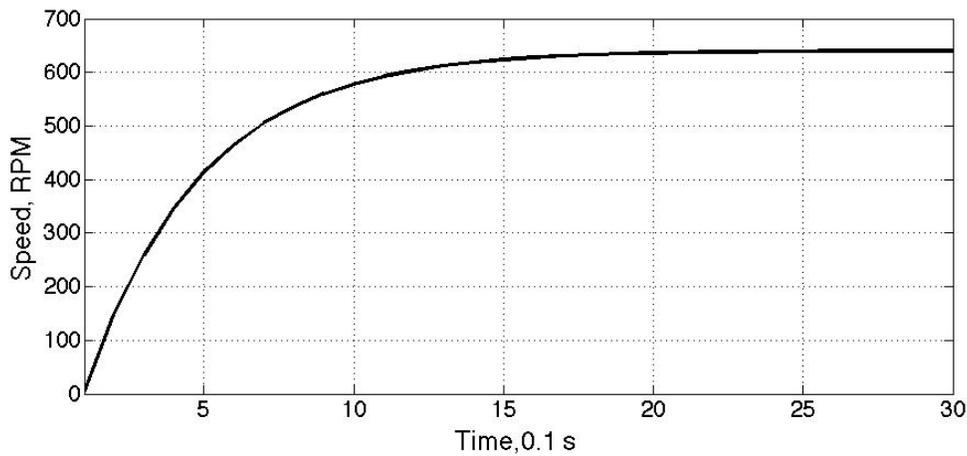


Figura 4. Curva de aproximación por medio de mínimos cuadrados

6. Conclusiones



La optimización para obtener a función de transferencia en un sistema real de manera experimental hace que sea común utilizar el método mínimos cuadrados. Es necesario conocer el comportamiento de un sistema en lazo abierto y determinar su comportamiento matemáticamente para poder simularlo.

Al simular su comportamiento basado en una aproximación matemática al sistema provoca que tengas experiencia para poder implementar a futuro cualquier lazo de control al sistema.

El trabajo futuro es calcular las ganancias para implementar un control PID o lógico difuso para cerrar el lazo de control de velocidad en donde el motor sea capaz de alcanzar determinados valores de *set point*.

7. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al Instituto Politécnico Nacional y CONACYT, por su apoyo económico en el desarrollo del proyecto.

Referencias

- [1] P . Pillay and R. “*Simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives*”, part ii: The brushless dc motor drive”, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 25, no. 2, pp. 274–279, Mar./Apr. 1989.
- [2] R. Shanmugasundram, K. M. Zakariah, and N. Yadaiah, “*Low-cost high performance brushless dc motor drive for speed control applications*”, IEEE Int. Conf. Adv. Recent Technol. Commun. Comput., Kottayam, India, Oct. 27–28, 2009, pp. 456– 460.
- [3] R.Kandiban and R. Arulmozhiyal, “*Speed control of BLDC motor using Adaptive Fuzzy-PID controller*”, International Conference on Modeling, Optimization Comput.,2012, pp.306-313.
- [4] M.N. Uddin and M.A. Rahman, “*Fuzzy logic based speed control of an IPM synchronous motor drive*”, IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, May.1999. pp.1259-1264.
- [5] H.S. El-Sayed, F.M. El-Khouly, M.N. Khater and A.M. Osheiba, “*Fuzzy logic based speed control of a permanent magnet brushless DC motor drive*”, International Conference on Electrical Engineering, April, 2007. pp.1-6.
- [6] Becerra, R.C.; Ehsani, M. “*High-Speed Torque Control of Brushless Permanent Magnet Motors*”. IEEE. 1988.
- [7] Vinatha, U.; Pola, S.; Vittal, K.P. “*Recent Developments in Control Schemes of BLDC Motors*”. In Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 2006), Mumbai, India, December 2006.



Adquisición de señales mioeléctricas superficiales generadas por posiciones específicas de la mano.

Torres Valverde Guadalupe Araceli^{1a}, Benitez Baltazar Víctor Hugo²

¹Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, ²Universidad de Sonora.
^aatorres@industrial.uson.mx

Resumen

En este artículo se describe la metodología experimental para la obtención de señales mioeléctricas (ME) superficiales colocando electrodos en cinco músculos del antebrazo de tres sujetos sanos que efectúan el agarre de objetos con geometría esférica. Se consideran las normas de SENIAM (surface EMG for a non-invasive assessment of muscles, por sus siglas en inglés) y se utiliza el sistema de captura Trigno™ Wireless EMG. El método práctico del experimento se detalla para la adquisición de datos que consta de las etapas de preparación del experimento, ubicación de los sensores en los músculos, ejecución de una contracción del músculo al sujetar la esfera y la grabación de la señal generada durante las contracciones. Se muestran las gráficas resultantes del proceso de adquisición de las señales EMG superficiales (sEMG), al realizar los participantes movimientos de sujeción de las esferas. El trabajo reportado en este artículo constituye una etapa importante para generar una base de datos de señales ME.

Palabras clave: Señales mioeléctricas, sensores, electromiografía superficial, SENIAM.

1. Introducción

El estudio de las manifestaciones bioeléctricas se acrecentó a partir de 1980, cuando las computadoras hicieron posible la tarea de realizar estudios completos y descomponer la señal electromiográfica (EMG). Trabajos pioneros fueron los de LeFever y De Luca junto con McGill y colaboradores [1-3]. La fisiología y matemática de la señal EMG fue discutida conjuntamente por primera vez en un artículo clásico publicado en 1979, donde De Luca proporciona el primer enfoque estructurado para el tema de extracción del contenido de información EMG [4]. El conocimiento de la electromiografía y el número de aplicaciones han aumentado considerablemente durante los últimos años, reflejándose en los campos de la biorretroalimentación, el control de prótesis, ergonomía, medicina del trabajo y el deporte, el análisis del movimiento y la evaluación de las funciones neuromusculares. Por ejemplo el análisis de la fatiga muscular se orienta al análisis de la señal electromiográfica superficial (sEMG) en el tiempo y dominios espectrales. Los índices de la fatiga se calculan sobre la base de la evolución temporal de las características de la señal durante la contracción. Así, la fatiga se puede evaluar desde el comienzo de un esfuerzo muscular. El análisis de la señal puede proporcionar una vía para la evaluación objetiva de la fatiga muscular, aunque las relaciones entre los cambios de la variable EMG y los fenómenos fisiológicos subyacentes son muy complejos y aún no se entienden completamente, por tal razón, son actualmente temas de estudio [5]. El potencial de las técnicas EMG en los estudios de los efectos de exposiciones en el trabajo se realizó de forma gradual. Uno de los propósitos del uso de sEMG desde el punto de vista ergonómico, es identificar los músculos que se activan durante un largo periodo de tiempo en una tarea de trabajo dada, para tal fin puede efectuarse un análisis del histograma de amplitud de una EMG [6]. Bajo esta idea, una escala de calibración se define para convertir la amplitud sEMG en unidades de fuerza. Esto requiere una serie de medidas de fuerza y amplitud durante las contracciones voluntarias estáticas. En la ergonomía, la carga física representa uno de los aspectos más importantes que se tratan en el diseño del trabajo y lugar de trabajo. En muchos sectores de la industria, el trabajo implica ciclos más cortos de operación, actividades monótonas,



provocando carga muscular focal. La atención de las investigaciones cambia de un problema circulatorio a uno de carga localizada en ciertas partes del sistema músculo-esquelético del operario.

Esta es un área en la que sEMG ha contribuido de manera sustancial [7]. Para la fisiología del deporte, extraer información de la señal eléctrica generada por el músculo activado siempre se ha considerado como una forma fácil de acceso a la actividad de los centros de control motriz. Esto se puede lograr invasivamente, por alambres o agujas insertadas directamente en el músculo, o no invasiva, mediante electrodos colocados sobre la superficie de la piel que recubre los músculos. El uso de sEMG es preferible en sujetos sanos sedentarios y en atletas, a pesar de las limitaciones y desventajas. Por ejemplo, la reproducibilidad de los resultados es difícil. Dentro de las principales áreas de investigación están la descripción de la función muscular normal durante movimientos y posturas seleccionadas, exploración de la actividad muscular en los deportes complejos, la validación de los estudios anatómicos clásicos, estudios de coordinación y sincronización, la fatiga y estudios de la relación fuerza-EMG [8]. En el análisis del movimiento, la sEMG tiene entre las principales aplicaciones, el estudio de las estrategias de control motor (que es la activación del agonista, sinérgico y músculos antagonistas), la investigación de la mecánica de la contracción muscular, análisis de la marcha, identificación de los factores fisiopatológicos, evaluación de la carga de trabajo en la biomecánica ocupacional y la biorretroalimentación en la rehabilitación motora. La EMG, en particular, sEMG, dio una gran ventaja al estudio del movimiento humano y del control motor. Su uso se aceleró con el hallazgo de la relación lineal que puede ser demostrada entre las señales ME medidas, ya sea por vía intramuscular o en la superficie, y algunas variables biomecánicas. Lo anterior fue por primera vez probado para contracciones isométricas usando un conjunto de condiciones [9]. Asimismo, las señales sEMG se han usado en análisis de la marcha antes del desarrollo de los sistemas optoelectrónicos modernos para las investigaciones cinemáticas. La definición de la secuencia de tiempo de activación de los músculos en la población normal se logró en varios estudios. Uno de ellos, contribuyó al entendimiento de los músculos involucrados en los casos normales y patológicos [10].

Con la tecnología de comunicación inalámbrica y el procesamiento de señales con computadoras de alta capacidad y bajo costo, la EMG se está convirtiendo en una herramienta accesible para el experimentador. Aunado a lo anterior, se dispone de dispositivos portátiles que hacen que sEMG proporcione una manera conveniente y no invasiva para determinar la activación muscular. El rápido crecimiento del número de aplicaciones resalta el potencial de la EMG, de tal modo que, diversos grupos de investigación establecen métodos de trabajo y análisis para satisfacer las necesidades propias de los problemas de sus disciplinas. Sin embargo, se intenta que EMG sea una herramienta estandarizada y bien aceptada por los usuarios. Para ello, se requiere la normalización para que los resultados puedan ser comparables y crear un cuerpo común de conocimientos sobre el uso de la sEMG en los diversos campos de aplicación. Los desarrollos metodológicos del análisis EMG se han unificado en la norma SENIAM. El documento presenta el proceso y los resultados del desarrollo de las recomendaciones para los sensores sEMG y procedimientos de colocación del sensor.

2. Electromiografía

La electromiografía (EMG) consiste en el estudio electrofisiológico del sistema neuromuscular. Etimológicamente, el término electromiografía se refiere al registro de la actividad eléctrica generada por el músculo estriado. EMG detecta las variaciones de voltaje que generan las fibras musculares como resultado de la despolarización de las membranas celulares durante la contracción. En la práctica, el término electromiografía se designa genéricamente a las diferentes técnicas utilizadas en el estudio funcional del sistema nervioso periférico, de la placa motora (sinapsis entre axones de motoneuronas y fibras musculares esqueléticas) y del músculo esquelético. EMG es una técnica experimental que trata el desarrollo, registro y análisis de señales mioeléctricas, las cuales se forman por variaciones fisiológicas en el estado de las membranas de la fibra muscular [11].

La contracción de fibras musculares genera actividad eléctrica que puede ser medida por electrodos fijados a la superficie de la piel próxima al grupo muscular. La señal sEMG captada usando



electrodos que monitorizan la actividad de múltiples fibras musculares puede ser modelada como un proceso estocástico variante en el tiempo con media cero [12]. Se ha observado, que la desviación estándar de la señal EMG (sin procesar) está monotónicamente relacionada al número de unidades motoras activadas y a la velocidad de su activación. Esta desviación estándar es usada para aproximar la magnitud de la actividad eléctrica muscular, referida como la amplitud EMG, teniendo una variedad de aplicaciones, tales como la señal de control para prótesis mioeléctricas, estimaciones ergonómicas, sistemas de biorealimentación para rehabilitación (biofeedback) y también es usada para estimar el par asociado a una articulación [13]. Existen inconvenientes tales como el *crosstalk*, que es la interferencia debida a la actividad eléctrica de los músculos contiguos [14].

3. Normas para la electromiografía superficial SENIAM

En este apartado se presentan las normas para la sEMG según SENIAM. El proyecto SENIAM es una acción europea concertada en el Programa de Salud e Investigación Biomédica (BIOMED II) de la Unión Europea y ha dado lugar a recomendaciones europeas para sensores y procedimientos de colocación del sensor y los métodos de procesamiento de señales para sEMG.

3.1 Características de los sensores

El término sensor, en lugar de electrodos, se utiliza para enfatizar el hecho de que cada medición sEMG necesita del ensamble de al menos 2 electrodos individuales y el preamplificador puede estar integrado en la carcasa. Con un electrodo bipolar se registra una única señal de sEMG como el diferencial de potencial eléctrico entre dos electrodos sobre el músculo que están relativamente poco espaciados en comparación con las dimensiones del músculo. El registro sEMG bipolar está influenciado por la forma, tamaños, posiciones y orientaciones de los electrodos y la distancia entre ellos. De esta manera, sensor se define como el conjunto de electrodos, integrados a un preamplificador, siendo una configuración de dos electrodos. El sensor utilizado para registrar la señal de sEMG, como se menciona en la página <http://www.seniam.org/>, debe poseer las siguientes propiedades o características:

- (1) tamaño y forma específica del electrodo.
- (2) material adecuado.
- (3) distancia entre electrodos (IED).
- (4) las modalidades de construcción.

Los estándares correspondientes son:

■ Medida del electrodo:	Diámetro < 10mm
■ Distancia entre electrodos (IED)	< 20mm, o < 1/4 de la longitud del músculo
■ Localización del electrodo	Cualquier distancia más pequeña entre la zona más distal de la inervación y el tendón distal.
■ Localización del electrodo de referencia	Entre la zona más próxima a la inervación y el tendón proximal; no sobre una zona inervada como la muñeca, el tobillo, la zona inervada por la espina en la c7 o en otra área eléctricamente inactiva.

3.2 Parámetros para amplificador



- Filtro pasa alto (baja frecuencia de corte) Para análisis espectral EMG < 10 Hz
- Solo para análisis de movimiento ~20 Hz
- Filtro pasa bajo (alta frecuencia de corte) Para aplicaciones generales ~500 Hz (frecuencia de muestreo > 1000 muestras/s)
- Para aplicaciones con un ancho de banda especial ~1000 Hz (frecuencia de muestreo > 2000 muestras/s)
- Nivel de ruido referido a la entrada de voltaje < 1 μ VRMS (en el ancho de banda 10-500)
- Nivel de ruido referido a la entrada de corriente Impedancia de entrada < 10 pARMS (en el ancho de banda 10-500)
> 100 MO (para electrodos convencionales).
> 1000 MO (para electrodo de aguja convencionales)
- Ganancia. Es conveniente recordar el rango de entrada del convertidor A/D con la resolución de entrada deseada.

4. Descripción del experimento

El procedimiento para el registro de las señales ME superficiales de los músculos del antebrazo de tres sujetos sanos se describe en esta sección. La señal sEMG es extremadamente compleja, siendo afectada por las propiedades fisiológicas y anatómicas de los músculos, el esquema de control del sistema nervioso periférico y las características de la instrumentación que es usada para detectar y observar estas señales. El diagrama de la figura 1 muestra las actividades para la adquisición de señales mioeléctricas superficiales generadas por posiciones específicas de la mano.

4.1 Preparación del experimento

Los datos EMG fueron registrados de tres participantes sanos, una mujer (M1) y dos hombres (H1, H2); rango de edad de 19 a 24 años. El participante ase tres esferas con diámetro diferente: D_1 , D_2 , D_3 ; 4.6154, 7.639 y 9.071 cm. respectivamente, de material poliestireno expandido (EPS). Sujetan las esferas en los tiempos indicados en la figura 2. Cada secuencia se repitió 30 veces. En total se tienen 30 repeticiones x 3 esferas, 90 mediciones de señales para cada voluntario. Se pide al participante sentarse cómodamente y sujetar una esfera específica D_i ($i = 1, 2, 3$) con la palma de la mano hacia arriba apoyada en una mesa y mantener la posición durante 3 s, después de los cuales, abre la mano para que sea retirada la esfera. 5 s fueron proporcionados hasta que se entregue otra esfera. Cada uno de los 3 sujetos realizaron un lote, que se define a efectos del experimento, como el agarre de tres esferas con intervalos de 5 segundos de reposo entre agarres y al final 15 segundos de relajación.

Seis contracciones están contenidas en cada lote (comienzo y final de agarre) y el orden en que se realizaron los movimientos fue aleatorizado para cada sujeto. Una breve contracción muscular voluntaria se lleva a cabo, lo que indica el comienzo de la señal. Los sujetos fueron instruidos para mantener sólo la pose de sostener la esfera. Otra contracción se produce justo antes de soltar la esfera, la mano está abierta; luego cambia a una posición relajada de los dedos de la mano, en lugar de regresar de forma activa a la posición neutral. Esta acción se repitió tres veces, completando un lote. La estructura de un lote individual se representa en la figura 2. Los usuarios fueron capacitados para mantener sus dedos relajados hasta que se realizan los movimientos y para producir una cantidad confortable de fuerza al principio y final del agarre de esfera; esto para los tres patrones diferentes de sujeciones. Se dejó un periodo de 15 s de relajación al final de cada lote para permitir que el sujeto esté preparado y evitar la captura de datos incompletos, cortando la captura antes de que se complete la acción final. Asimismo, esto fue diseñado para superar los efectos de la fatiga muscular. Se presenta el



diagrama de tiempos del experimento en la figura 3. Mientras que en la figura 4, se tiene el diagrama de tiempo junto con pulso de dirac.

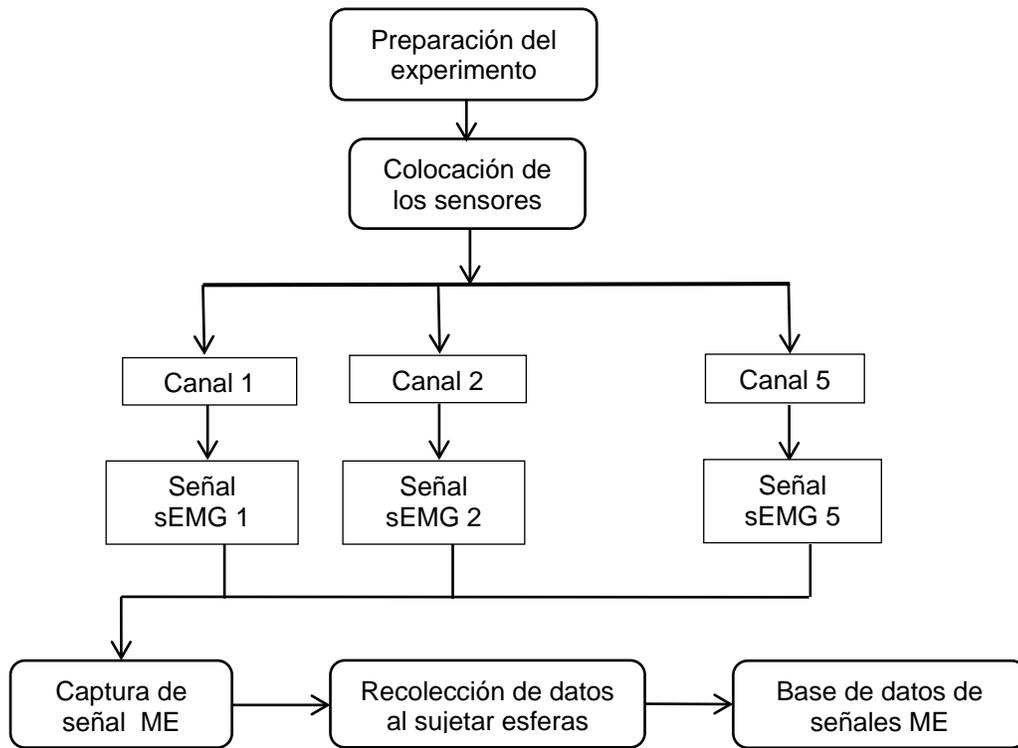


Figura 1. Diagrama de flujo para captura de señales ME de los movimientos de las manos.

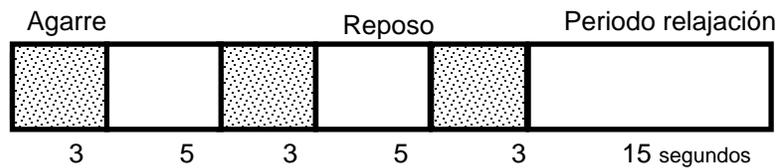


Figura 2. Lote con tres eventos de agarre de esferas. Duración total 34 s.

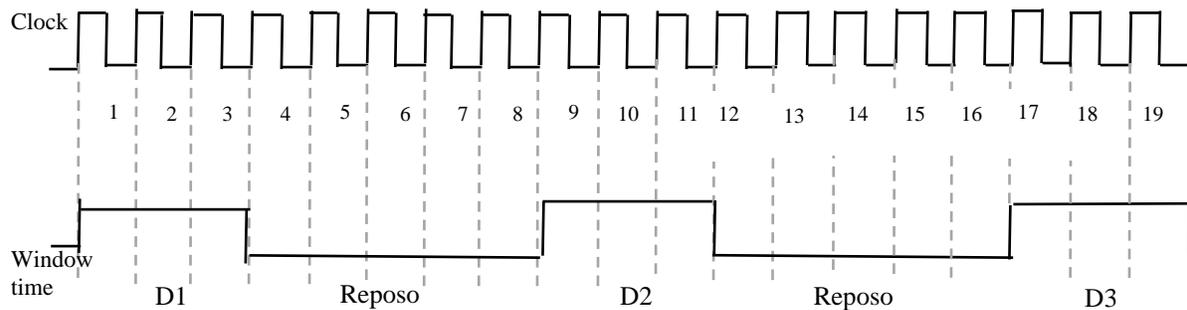


Figura 3. Diagrama de tiempo para un lote.

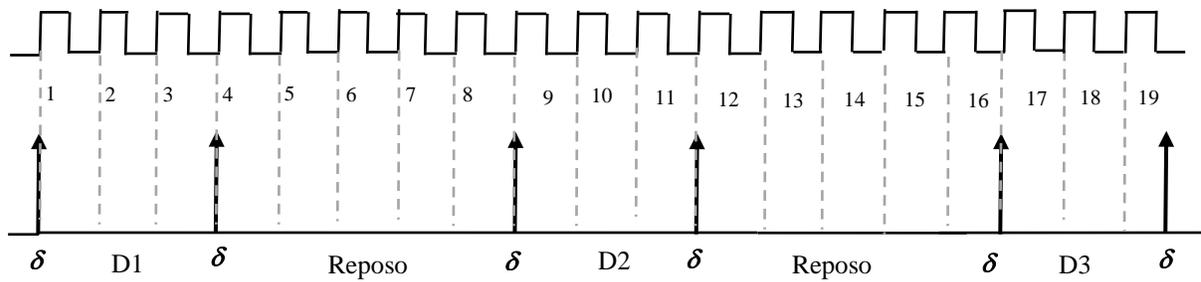


Figura 4. Diagrama de tiempo y pulso δ por contracción. $\delta(t)$: pulso muy corto.

En la sección 4.5 se presenta el registro de la señal EMG superficial. La asignación aleatoria de ejecución se muestra en tabla 1.

Tabla 1. Orden de las corridas del experimento.

Participante	Orden	Muestras
M1	D ₃ , D ₂ , D ₁	90
H1	D ₁ , D ₂ , D ₃	90
H2	D ₂ , D ₃ , D ₁	90

El formato para recabar la información de los participantes se muestra en tabla 2:

Tabla 2. Datos personales de los participantes del estudio.

Participante	Nombre	Edad	Peso (Kg)	Altura (m)
M1				
H1				
H2				

4.2 Muestreo y Conversión A/D

Es habitual tener una señal continua en el tiempo que se analizará y se requiere obtener una representación discreta de la misma. La forma más común de adquirir una representación discreta de una señal continua se denomina muestreo periódico. Se abstraen valores de la señal en instantes de tiempo regularmente espaciados. Con T_s como el periodo de muestreo (tiempo entre dos muestras), se denomina frecuencia de muestreo (número de muestras por segundo) a su inversa $f_s=1/T_s$. La operación de muestreo no es generalmente reversible, ya que existen muchas señales continuas que pueden producir la misma salida de muestras discretas. Esta ambigüedad inherente en el proceso de muestreo es de capital importancia en el procesamiento de señales. El teorema de Nyquist establece que una señal para poder ser muestreada, estará por lo menos en una proporción de dos veces la frecuencia de su armónico más alto, esto con el fin de evitar una pérdida de información; este fenómeno es llamado aliasing [15]. Para casi todos los músculos y la mayoría de las aplicaciones en EMG, el rango de frecuencias en la señal entre 400 a 450Hz, es donde están los más altos armónicos; de tal modo que se requiere un filtro pasa bajo (anti-aliasing) con una frecuencia de corte fijada a estos rangos y un muestreo de al menos 1,000 muestras por segundo.

4.3 Sistema de captura Trigno™ Wireless EMG

El equipo Trigno™ Digital Lab y los sensores se muestran en la figura 5. La resolución es de 16 bits y la frecuencia de muestreo puede ser hasta 4,000 Hz. Las ventajas del sensor son bajo crosstalk, reducción del ruido por el movimiento, ya que el sistema amplifica la señal en la fuente e impide el movimiento del sensor por mala adherencia a la piel, eliminando las principales fuentes de ruidos. Al mantener constante la distancia entre electrodos, el sensor proporciona consistencia en el registro de los datos. De esto se deriva, que se pueda tener repetibilidad en los resultados del experimento. La figura 6, ilustra la diferencia entre un sensor bipolar típico y el sensor Trigno.



Figura 5. Sensor estándar Trigno™

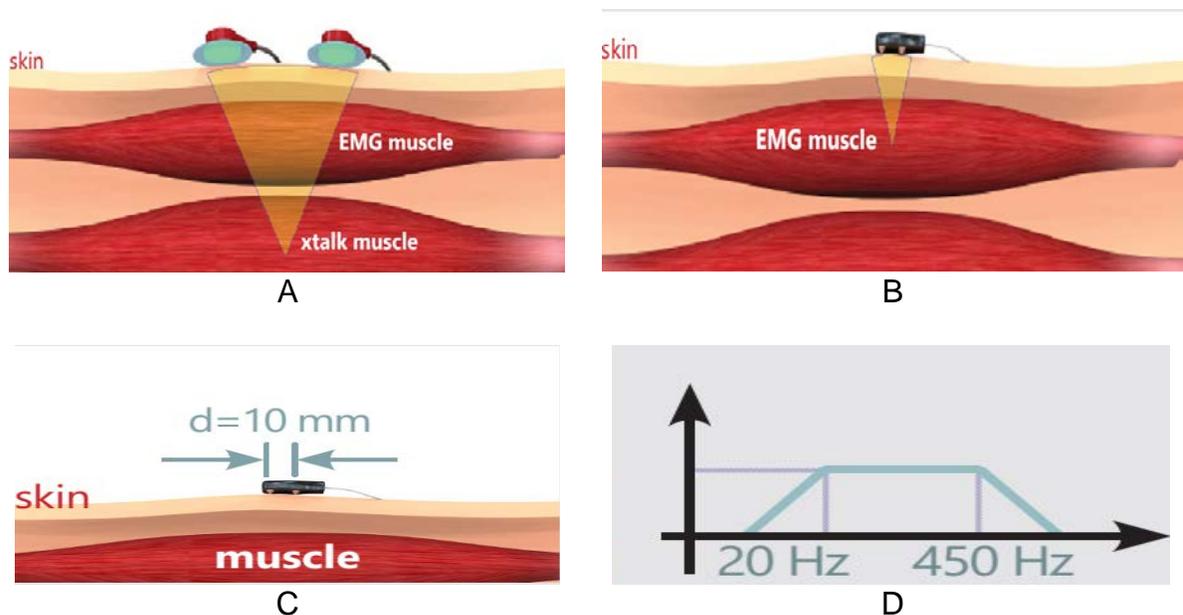


Figura 6. El sensor bipolar en A) tiene un alto riesgo de croostalk por que la distancia entre electrodos es > 10 mm. En B) El Sensor Trigno™ detecta la señal del musculo inmediato bajo la piel. En C) se muestra la distancia entre electrodos, que al ser constante, descarta un factor de variabilidad en los datos, teniendo consistencia en el registro de los datos.

Las especificaciones de EMG se presentan en la tabla 3:

Tabla 3. Especificaciones EMG sensor Trigno™

Rango ¹	11 mV (r.t.i.)
Resolución (EMG Signal) ²	168 nV/bit (LSB)
Bandwidth (EMG signal) ³	20 ± 5 Hz > 40 dB/dec 450 ± 50 Hz > 80 dB/dec
Passband Ripple	<2%
Ruido global del canal	<0.75µV
CMRR ⁵	>80dB
Tasa de muestreo	1926 muestras/seg
Número de contactos	4
Dimensiones del contacto	5 x 1 mm
Material del contacto	99.9 % plata

1. El rango se caracteriza por la entrada del sensor EMG y se muestrea con 16 bits.
2. Resolución ADC se especifica para la entrada del sensor.
3. El filtro está diseñado como un aplanamiento máximo Butterworth para preservar amplitud de la señal EMG y la linealidad de fase.
4. El ruido de entrada referida se calcula como la raíz cuadrada media sobre una ventana de 5 segundos muestreada a 2 kHz.
5. CMRR se mide para una señal de mínimo 1V modo de entrada común cuadrada a una frecuencia de 60 Hz.
6. EMG velocidad de muestreo de la señal es intrínseca al sensor y no se puede cambiar. Esto ha sido optimizado para el ancho de banda de comunicación y diseños de acondicionamiento de la señal.
7. DAC Filtro de ancho de banda: DC-500 Hz, 160 dB/Dec.

4.4 Localización de los sensores en el antebrazo

La información de datos se puede aumentar, para un valor de tiempo τ mediante la adición de canales adicionales [16]. Este enfoque dará un aumento de SNR de hasta N canales. Cinco canales se utilizaron en el experimento. Una indicación auditiva se utiliza para que el participante inicie la sujeción de la esfera y otra al transcurrir 3 segundos para terminar el movimiento, sincronizándose los datos. Los sensores se colocan en cinco músculos del antebrazo, mostrados en la figura 7.

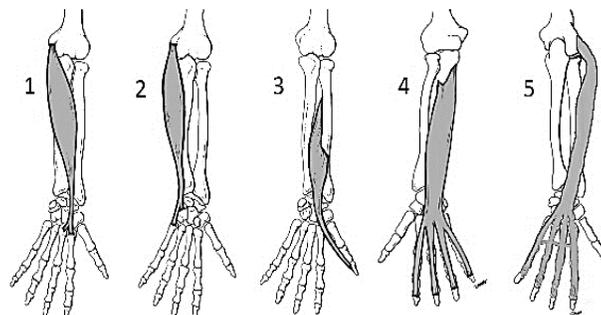


Figura 7. Identificación de los músculos del antebrazo: (1) flexor carpi radialis, (2) flexor carpi ulnaris, (3) flexor pollicis longus, (4) flexor digitorum profundus and (5) extensor digitorum.

4.5 Registro de la señal EMG superficial

- El primer paso en el registro de la señal EMG consiste en la colocación de los electrodos de superficie, como se observa a un participante en la figura 8. Para reducir algunos factores que provocan la



interferencia en la señal, se intenta que la impedancia de la piel sea baja, lo que se logra frotándola con alcohol, previo rasurado del antebrazo. Esta limpieza favorece la adherencia del pegamento de la etiqueta, logrando una fijación del sensor sobre la piel, haciendo contacto completo.

- Segundo, se captura la información personal del participante en la tabla 2.
- Tercero, se colocan las esferas en la mesa en el orden aleatorio que fue asignado en la tabla 1.
- Cuarto, se comprueba que exista comunicación entre los sensores Trigno™ Wireless EMG y la computadora, efectuando unas corridas del experimento. Se especifican en el software, las indicaciones auditivas que corresponden al tiempo de inicio y terminación del movimiento; un sonido diferente se usa para señalar el momento de relajación de 15 segundos.
- Quinto, al observarse el registro adecuado de la señal ME del paso anterior, se procede a la captura de las 90 señales. En la figura 9, está la sucesión de eventos de movimientos que el participante acciona al agarrar, aplicar fuerza leve por un instante y luego, sostener la posición de sujeción de la esfera.
- Sexto, el sistema de captura crea un archivo para cada muestra, esto es, se registra la señal que consta de los 34 segundos de duración total de un lote, como se ilustró en la figura 3. Termina el experimento.



Figura 8. Colocación de electrodos superficiales.

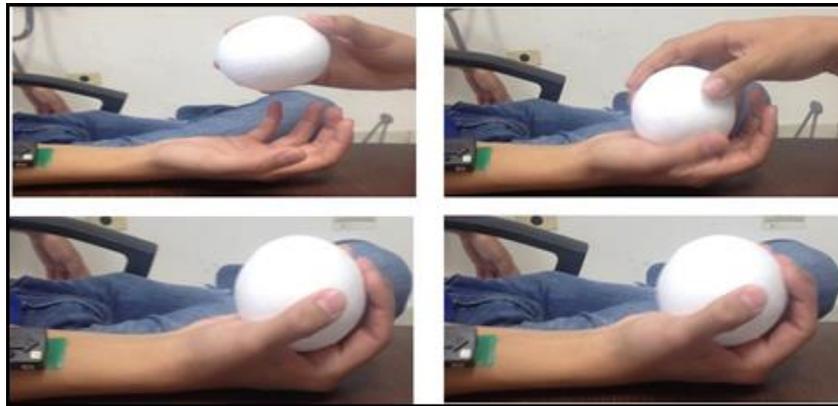


Figura 9. Movimientos de los dedos de la mano para agarrar la esfera, aplicar una breve contracción muscular y sostener la pose.

5. Resultados

Las señales sEMG se obtuvieron de 3 sujetos que realizaron 30 veces el movimiento de sujeción para cada una de las tres esferas. En total se capturaron 90 señales por participante. Se generaron gráficas de las señales con el software EMGWorks incluido en el equipo Trigno™ Wireless EMG de la empresa Delsys. Las gráficas que se mostrarán en las figuras 10 a la 12, se observa el registro de la señal de un lote del canal 1 para cada participante.

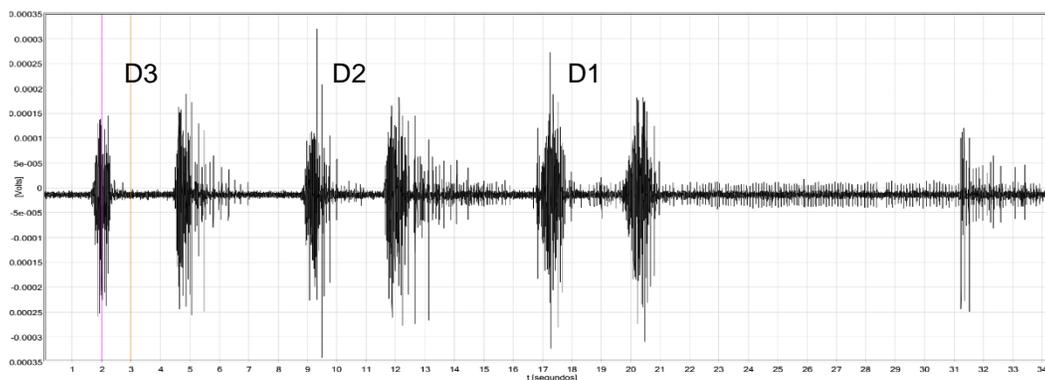


Figura 10. Un lote de tres agarres de esfera del sujeto M1, canal 1. Eje X representa el tiempo (s), eje Y es amplitud (Volts).

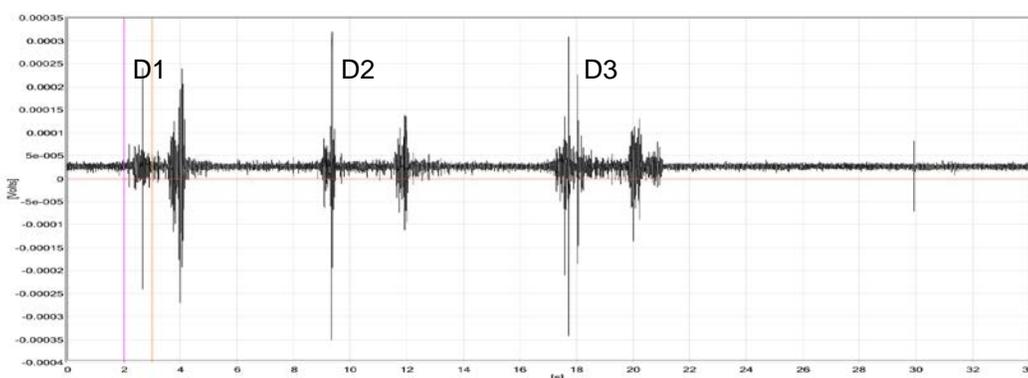


Figura 11. Un lote de tres agarres de esfera del sujeto H1, canal 1. Eje X representa el tiempo (s), eje Y es amplitud (Volts).

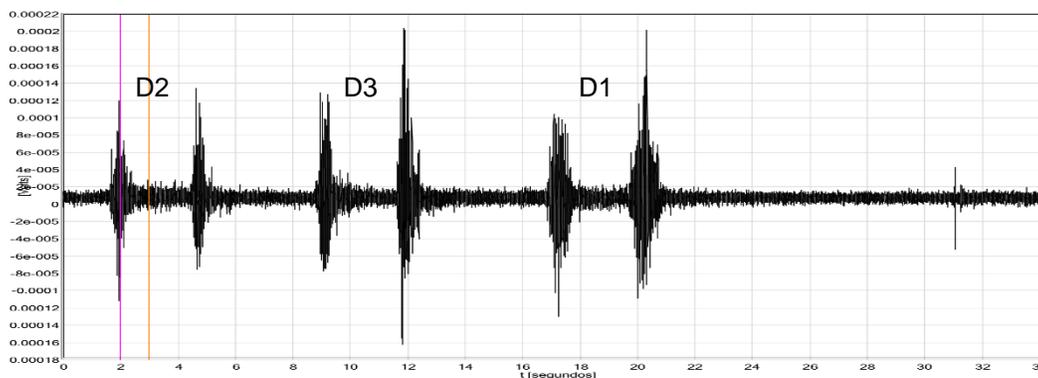


Figura 12. Un lote de tres agarres de esfera del sujeto H2, canal 1. Eje X representa el tiempo (s), eje Y es amplitud (Volts).

Las figuras anteriores claramente exponen los periodos de descanso que se introdujeron entre los movimientos de agarre de esfera, como se establecieron en el diseño del experimento. También se destacan visualmente los 15 segundos del periodo de relajación entre la ejecución de los lotes.

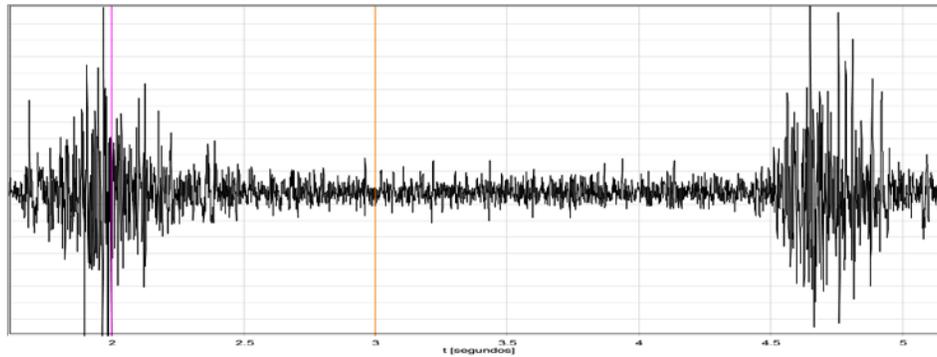


Figura 13. Señal ME del movimiento de la mano al sujetar esfera D₂ del sujeto H2, canal 1.

Las dos fases de la señal sEMG se aprecian con mayor facilidad en la figura 13. El sujeto al cerrar la mano para posicionar los dedos para el agarre de la esfera, es el momento que comienza la contracción muscular. El periodo de contracción se divide en una fase de inicio, llamada estado transiente, con una duración aproximada de 1 segundo y posteriormente, la fase de estado estacionario, donde las características de la señal se suponen constante en el tiempo. En la gráfica se observa que el lapso de tiempo del estado estacionario es cercano a tres segundos. La amplitud de la señal es mayor en las contracciones iniciales y finales que se realizan al sujetar y abrir la mano para poder retirar la esfera. Durante la pose de sostener, en cambio, la amplitud es menor, ya que el participante no aplica una contracción voluntaria constante. Esto denota la influencia que tiene el diseño del experimento en el registro de la señal sEMG. Dependiendo del objetivo de estudio, se establecerán la cantidad de sensores requeridos, la elección de los músculos apropiados, tamaño de muestra (cantidad de señales), participantes y otros aspectos relacionados.

6. Conclusiones

El propósito del trabajo de experimentación es aplicar el procedimiento para la captura de señales EMG superficiales al efectuar los sujetos movimientos de agarre y sujeción de objetos con geometría esférica. Se explicó el diseño del experimento, siguiendo las recomendaciones SENIAM. Se trató la importancia de analizar cuál es el número y la colocación de electrodos más conveniente según el problema. A la vez, el efecto de la captura y procesamiento de la señal en la interpretación de los datos. La intención es obtener conclusiones correctas a partir de los datos de sEMG. La EMG se puede utilizar de forma más fiable y a un costo aceptable, por lo que es factible en un mayor número de aplicaciones. Los investigadores continúan laborando para reducir los elementos que afectan el registro fidedigno de la señal EMG. El requisito de la digitalización de la señal de sEMG depende de las amplitudes más pequeñas y altas esperadas. La detectabilidad de baja amplitud de la señal de sEMG está limitada por el nivel de ruido del sistema amplificador. Amplificadores modernos tienen un nivel de ruido de unos μ Vs. Por lo tanto, una digitalización de alrededor de 0,5 mV / bit es suficientemente precisa. La EMG ha dejado de ser una técnica para constituirse como un conjunto científico fundamentado en los métodos experimentales del estudio del movimiento humano. Los estudios pioneros para comprender la contracción muscular y las iniciativas del proyecto SENIAM fueron las bases para esta transición.

Algunos de los desafíos en el análisis de la señal ME se han superado a través del desarrollo de sensores inalámbricos de rango de operación amplio, técnicas de procesamiento de señales y algoritmos de cálculo; pero otros problemas aún persisten por la naturaleza del fenómeno analizado. Los procesadores actuales adquieren y filtran señales en tiempo real empleando paquetería cada vez más portátil. El modelado por computadora y el software están facilitando el conocimiento acerca de la señal mioeléctrica. El reconocimiento de patrones y máquinas de aprendizaje estiman la predicción de los movimientos y la actividad muscular.



Los estudios efectuados permitirán el procesamiento de las señales ME para propósitos de diseño de sistemas de control ME. Actualmente se están realizando experimentos adicionales para adquisición de las señales ME aplicando la metodología experimental descrita en este artículo. El conjunto de dichas señales formará una base de datos, siendo una contribución importante para las investigaciones relativas al reconocimiento de patrones de agarres o sujeción de objetos con la mano, control de prótesis de la mano e interacción hombre máquina.

Referencias

- [1] LeFever, R. S., and DeLuca, C. J. "A procedure for decomposing the myoelectric signal into its constituent action potentials: I. Technique, theory and implementation," *IEEE Trans BME* **29** (3), pp.149–157, 1982.
- [2] LeFever, R. S., and DeLuca, C. J. "A procedure for decomposing the myoelectric signal into its constituent action potentials: II execution and test of accuracy," *IEEE Trans BME* **29** (3), pp.158–164, 1982.
- [3] McGill, K. C., Cummins, K. L. and Dorfman, L. J., "Automatic decomposition of the clinical electromyogram," *IEEE Trans BME* **32** (7), pp. 470–477, 1985.
- [4] De Luca, C. J., "Physiology and mathematics of myoelectric signals," *IEEE Trans BME* **26**, pp. 313–325, 1979.
- [5] Merletti, R., Rainoldi, A. and Farina, D., "Myoelectric Manifestations of Muscle Fatigue", in *Electromyography: Physiology, Engineering and Noninvasive Applications*, Merletti R and Parker, P. Ed., pp. 233-253, New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
- [6] Jonsson, B., "Measurement and evaluation of local muscular strain in the shoulder during constrained work," *J Hum Ergol*, **11**, pp. 73–88, 1982.
- [7] Hägg G. M., Melin, B. Kadefors, R., "Applications in Ergonomics", in *Electromyography: Physiology, Engineering and Noninvasive Applications*, Merletti R and Parker, P. Ed., pp. 343-358, New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
- [8] Felici, F. "Applications in Exercise Physiology", in *Electromyography: Physiology, Engineering and Noninvasive Applications*, Merletti R and Parker, P. Ed., pp. 365-377, New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
- [9] Lippold, O. C. J., "The relation between integrated action potentials in a human muscle and its isometric tension," *J Physiol*, **117**, pp. 492–499, 1952.
- [10] Perry, J., "Gait analysis, normal and pathological function," Slack Inc., Thorofare, NJ, 1992.
- [11] Basmajian J.V. y De Luca C.J. "Muscles Alive: Their Function Revealed by Electromyography", Williams Wilkins, Baltimore, 1985.
- [12] De Luca, C.J., "The use of surface electromyography in biomechanics", *Journal of Applied Biomechanics*, **13**(2), pp. 135-163, 1997.
- [13] Clancy, E.A. y Hogan, N. "Relating Agonist-Antagonist Electromyograms to Joint Torque During Isometric, Quasistatic, Nonfatiguing Contractions". *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol 44, No. 10, pp. 1024-1028, 1997.
- [14] De Luca, C.J. "Surface Electromyography: Detection and Recording", Technical Report, Delsys, 2002.
- [15] DELSYS, *Fundamental Concepts in EMG Signal Acquisition*. March 2003 edition.
- [16] Parker, P. A., Englehart, K. B. and Hudgins, B. S. "Control of Powered Upper Limb Prostheses," in *Electromyography: Physiology, Engineering, and Noninvasive Applications*, Merletti, R. and Parker, P. Ed., Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.



Sistema de visión para inspección de nivel, etiquetado y sellado correcto en proceso de embotellado

Méndez Guzmán Hugo Antonio, Carrillo Delgado Cesar Paul, Solano Ponce Jonathan Iván, Osorio Muñoz Jaime, Barajas Guardado Ruth Noemí

Universidad Politécnica del Bicentenario
Carretera Silao-Romita km. 2, San Juan de los Durán, C.P. 36283. Tel. (472) 72 38 700
hmendezg@upbicentenario.edu.mx

Resumen

Los procesos actuales automatizados exigen una estandarización en sus procedimientos, incluyéndose entre las principales las industrias de envasado para el área farmacéutica y alimentaria, teniendo entre sus procesos la inspección visual de sus productos en etapas de llenado, sellado, y etiquetado correcto. Este trabajo presenta la implementación de una interfaz de usuario para la configuración de un sistema de inspección en tiempo real, usando como sensor de visión una webcam común, que en conjunto con las herramientas presencia-ausencia, permite al usuario la detección de defectos en envases como: mal etiquetado, sellado incorrecto del envase, rotura del arillo de seguridad y nivel de líquido insuficiente en cada envase. El sistema de inspección se desarrolla mediante un GUI a través del software Matlab, ajustando las tolerancias permisibles para cada tipo de inspección y con respecto a una imagen patrón, tal que una botella inspeccionada al no cumplir con las características y tolerancias programadas, el envase es considerado defectuoso enviando una señal de alerta para posteriormente rechazar el producto no terminado. Así mismo en el presente trabajo se explican conceptos base para la comprensión del funcionamiento de las herramientas Presencia-Ausencia en un sistema de visión industrial y el uso de algunas de ellas para la detección de defectos en envases plásticos, con fines puramente académico.

Palabras clave: Proceso de embotellado, Sistemas de visión, Automatización.

1. Introducción

Los procesos de producción en serie, específicamente el llenado de envases, que engloba una gran gama de productos, y con gran demanda en el mercado como son las empresas refresqueras, distribuidoras de lubricantes, por mencionar solo algunas de las más importantes, requieren de sistemas innovadores que den la certeza de que las especificaciones establecidas en el proceso, están siendo cumplidas.

Hoy en día las empresas buscan mantener sus procesos eficientes. La manufactura esbelta es una práctica de producción que tiene en cuenta costos y recursos persiguiendo como objetivo un valor del producto hacia el cliente final, corrigiendo el proceso en sus procedimientos así como la calidad del producto final [1]. Con respecto a la calidad del producto existen herramientas que permiten seguir una filosofía de cero defectos, teniendo entre ellas la inspección visual del producto para la detección de anomalías, implementando sistemas Poka-Yoke y creando funciones de advertencia para verificar ajustes en maquinarias o corrección del proceso en general [2].

En los últimos años la visión artificial ha jugado un papel muy importante como herramienta estándar para el análisis de procesos, permitiendo la inspección continua, análisis de errores, errores de aspecto, color, dimensiones, etcétera [3].



La implementación de un sistema de visión conlleva el uso de lentes, cámaras, sistemas de iluminación y un software especializado con herramientas estándar (algoritmos para procesamiento de imagen) configurables para la detección de defectos, sin embargo a nivel académico, no en todas las universidades se cuenta con cámaras especializadas para la enseñanza y aplicación de los diferentes algoritmos en sectores productivos, por lo que este trabajo se basa en la descripción de algunos de ellos y su aplicación en ambientes productivos que conlleven el uso de envases plásticos.

El sistema de visión propuesto para inspección de nivel de líquido, etiquetado y sellado, trae la propuesta prototipo de aplicar un sistema de visión mediante una webcam a dicho proceso, que una vez que el envase ha sido llenado, etiquetado y sellado, será capaz de detectar cualquier envase que no cumpla con los parámetros establecidos que dan paso al envase al siguiente proceso.

2. Herramientas Presencia-Ausencia

Un sistema de inspección cuenta con múltiples herramientas para detección, conteo, análisis dimensional, etc. Entre las principales se encuentran las herramientas presencia-ausencia, cuya finalidad es determinar si una característica está presente o ausente en la imagen sobre una región de interés (ROI).

Entre las principales herramientas Presencia-Ausencia de un sistema de visión industrial se encuentran Luminosidad, Recuento de píxeles, Blob, Margen y Círculo [4]. Sin embargo para los defectos analizados en este trabajo solo se detallan la aplicación de las herramientas Luminosidad y Recuento de píxeles. Cada una de estas herramientas permite realizar una medición inmediata sobre una imagen patrón, para posteriormente establecer rangos de rechazo (tolerancias) sobre piezas que no cumplan un estándar.

2.1. Luminosidad.

Esta herramienta determina si una característica está presente o ausente basándose en la intensidad promedio de escala de grises (es decir, brillo). Comunica una aceptación si la puntuación del área de la región se encuentra dentro de los límites o un rechazo si está fuera de ellos. Matemáticamente el brillo de una imagen se define como:

$$\bar{g} = \frac{\sum_{g=0}^{L-1} g N(g)}{M} \quad (1)$$

Donde L, N (g) y M son el número de niveles de gris contenido en una imagen, número de píxeles en el nivel de intensidad g y el número de píxeles en la imagen, respectivamente [5].

2.1 Recuento de Píxeles.

Determina si una característica está presente o ausente basándose en el número de píxeles claros u oscuros de una región; comunica una aceptación si el número de píxeles de la región está dentro de los límites o un rechazo si esta fuera de ellos. El recuento de píxeles claros y oscuros se pueden expresar matemáticamente como:

$$n_B = \sum_{i=0}^{M-1} P(i) \quad (2)$$

$$n_D = M - n_B \quad (3)$$

con

$$P(i) = \begin{cases} 1 & \text{sí } f(i) \geq T \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (4)$$

Como se puede apreciar en la ecuación 4, $P(i)$ denota la operación de umbralización sobre cada uno de los M píxeles de la imagen.

2.2 Blob.

Determina si está presente o ausente un grupo de píxeles claros u oscuros conectados, denominado Blob. Comunica una aceptación si la característica del Blob está dentro de los límites, o un rechazo si está fuera.

Esta herramienta es muy similar a la de recuento de píxeles, sin embargo, la herramienta de blob una vez que ha umbralizado la imagen elige de entre los objetos localizados (segmentos en blanco dentro de la región de interés ROI verde mostrado en la figura 1) el objeto más relevante de la región. El objeto más relevante de una imagen puede ser elegido por criterios de integridad de contorno o área mayor en píxeles, para nuestro caso por área.

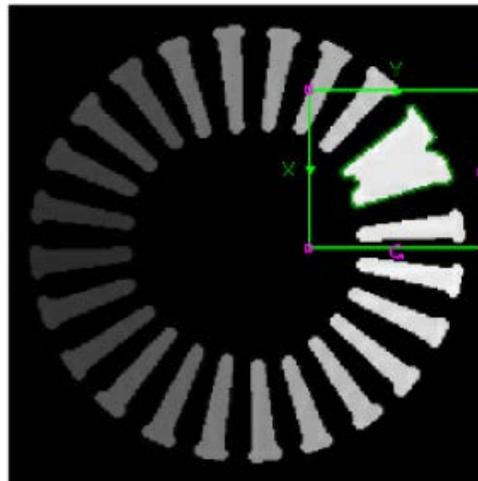


Figura 1. Segmentación por Blob

3. Sistema de Inspección Visual

3.1 Proceso de Inspección.

El funcionamiento de un sistema de inspección de envases se puede representar mediante un diagrama de flujo (figura 2), su funcionamiento comienza a partir de la toma de una imagen de prueba, asumiendo que esta es una pieza OK y con la cual se ajustan las herramientas necesarias para detectar cada uno de los defectos en envases que serán verificados posteriormente. Para cada defecto se debe asignar un ROI (Región de interés a analizar) y las herramientas de presencia ausencia adecuada para su análisis, tal que para la verificación de los defectos en los envases como mal etiquetado, sellado incorrecto del envase, y variación en el nivel de líquido requerido para el llenado de cada envase, solo sea necesario agregar más herramientas como una lista ordenada de parámetros en la tarea de inspección.

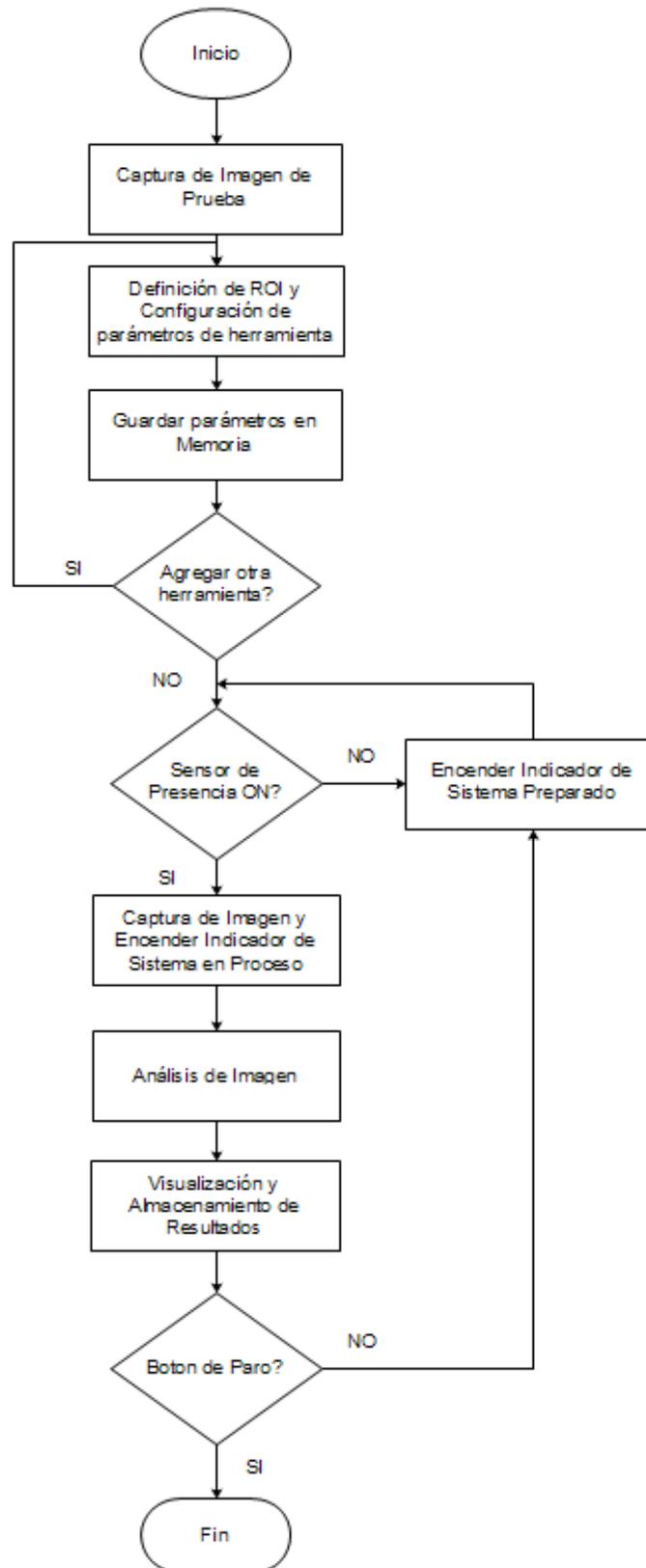


Figura 2. Proceso de verificación por inspección visual.



Una vez asignada la lista de verificaciones el sistema entra en marcha por la detección de un envase a través de un sensor de presencia, el cual envía una señal digital al sistema de adquisición para indicar el inicio de la etapa de análisis de la imagen. Este proceso continúa de forma indefinida inspeccionando cada una de los envases que se introduzcan en el sistema y mostrando en pantalla los resultados de cada inspección, que a través de la comparación de características físicas con la imagen patrón, el sistema determina si el envase cumple con los parámetros establecidos, de no ser así es un envase defectuoso y es rechazado por un sistema mecánico.

3.2. Detección de defectos en envases en base a herramientas Presencia-Ausencia.

Acorde a las características antes descritas podemos definir entonces los criterios para la búsqueda de defectos en los envases.

Entre las características más distinguibles en cuanto a la presencia o ausencia de elementos de un envase se encuentran regiones con cambio de luminosidad drástico, de oscuro a claro o viceversa en una zona específica; estas regiones pueden ser detectadas por la medición de luminosidad y puede ser aplicada en la detección del líquido del envase (figura 3).

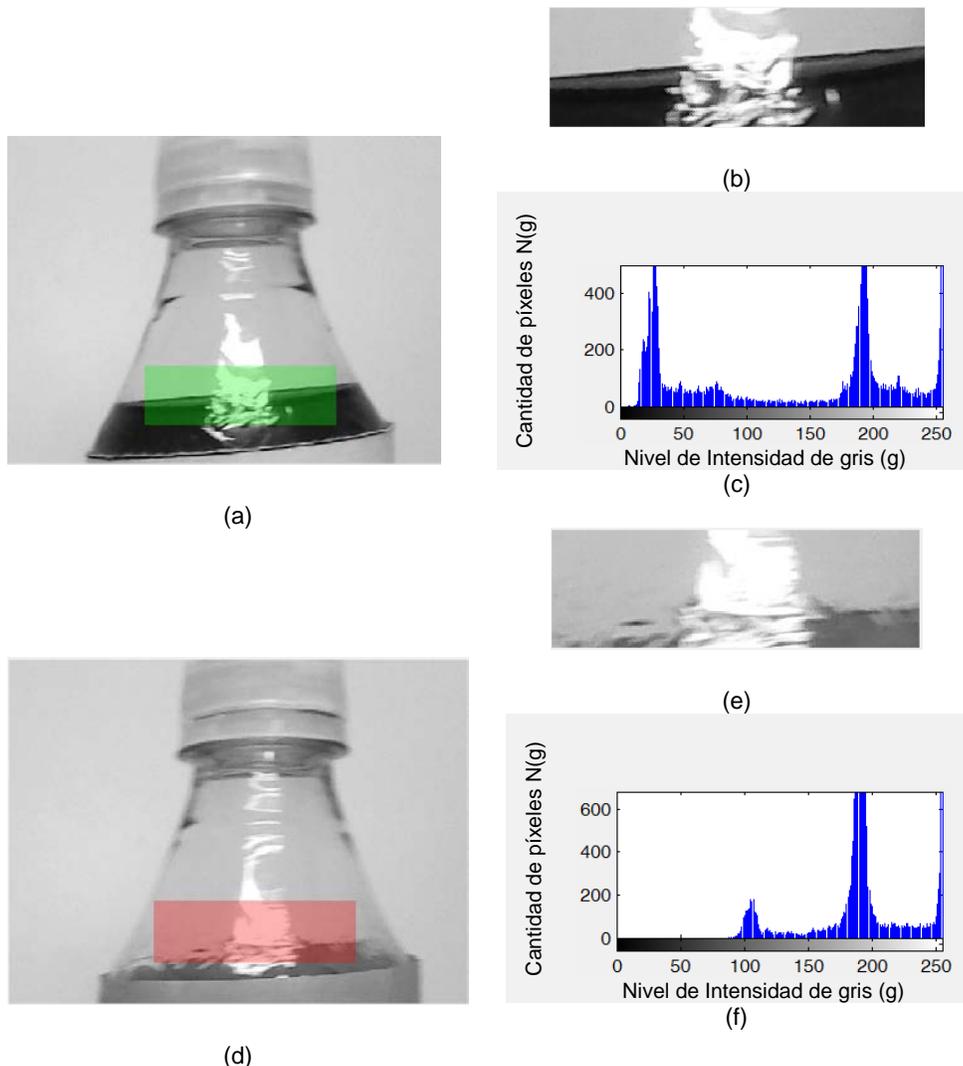


Figura 3. Inspección de nivel de líquido en envase, (a) Envase con nivel adecuado, (b) Región de interés en (a), (c) histograma de (b), (d) Envase con insuficiencia de líquido, (e) Región de interés en (d), (f) histograma de (e).

En la figura 3c y 3f se muestra claramente las diferencias en la distribución de niveles de gris sobre las regiones resaltadas 3a y 3d, mostrando un desplazamiento del histograma en esa sección y por ende un cambio de luminosidad drástico.

Así mismo existen cambios en la luminosidad en una región que modifica la distribución de niveles de intensidad sobre la imagen, modificaciones presentes en defectos como envase mal enroscado, tal como se muestra en las figuras 4.

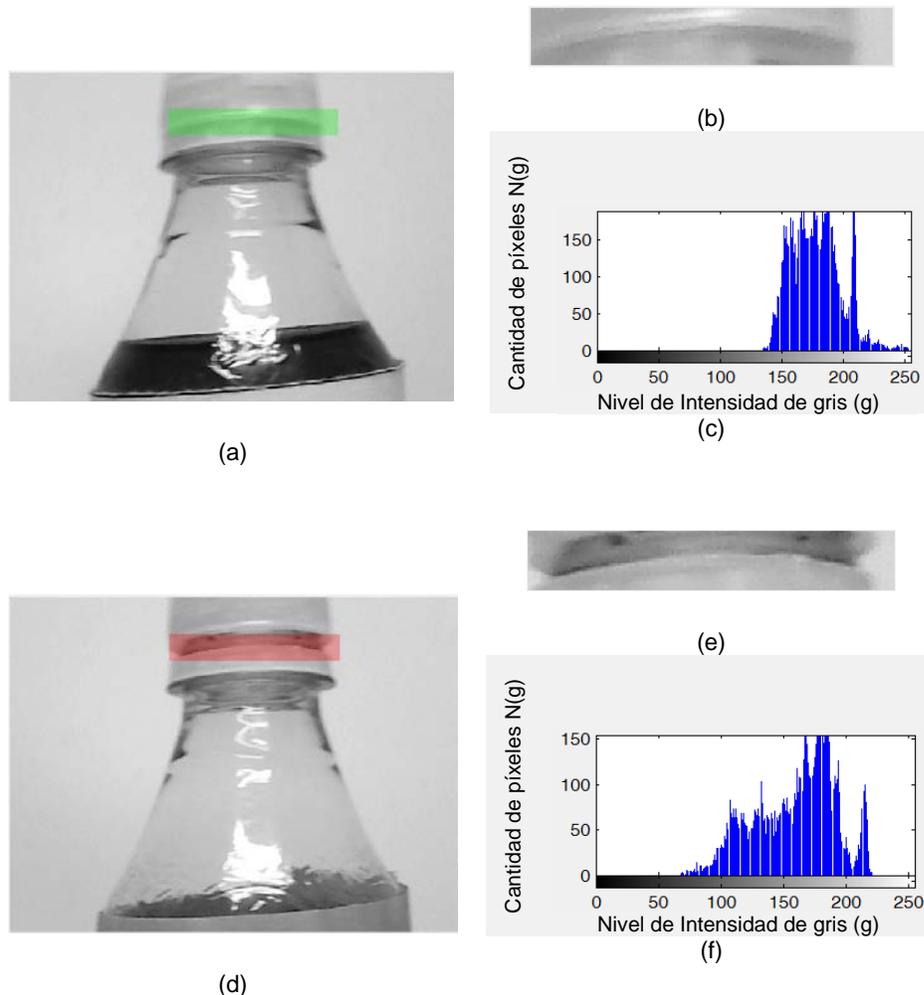


Figura 4. Defectos de enroscado, (a) Envase enroscado adecuadamente, (b) Región de interés en (a), (c) histograma de (b), (d) Envase enroscado parcialmente, (e) Región de interés en (d), (f) histograma de (e).

La figura 4c y 4f muestran un cambio drástico de luminosidad en la misma región de los envases mostrados en las figuras 4a y 4d.

En distinción a los defectos previos, la detección de imperfecciones en el arillo de seguridad no se realizaría de forma adecuada con la herramienta de luminosidad, ya que sus niveles de intensidad y distribución en la imagen son muy similares. Sin embargo como se aprecia en la figura 5 cuando un arillo de seguridad se encuentra roto existe una diferencia en la cantidad de píxeles claros y oscuros a través de la binarización en la región, por lo que la herramienta de Recuento de Píxeles es más

adecuada y nos proporciona una diferencia evidente entre la cantidad de píxeles oscuros cuando existe o no imperfección en el anillo de seguridad.

Las figuras 5c y 5f muestran que los histogramas de las regiones resaltadas en 5a y 5c son prácticamente iguales, pero si presentan una diferencia en cuanto ambas regiones son umbralizadas, tal que las imperfecciones en arillo de seguridad como fragmentación pudieran ser medidas de forma adecuada ya sea con las herramienta de conteo de píxeles o blob.

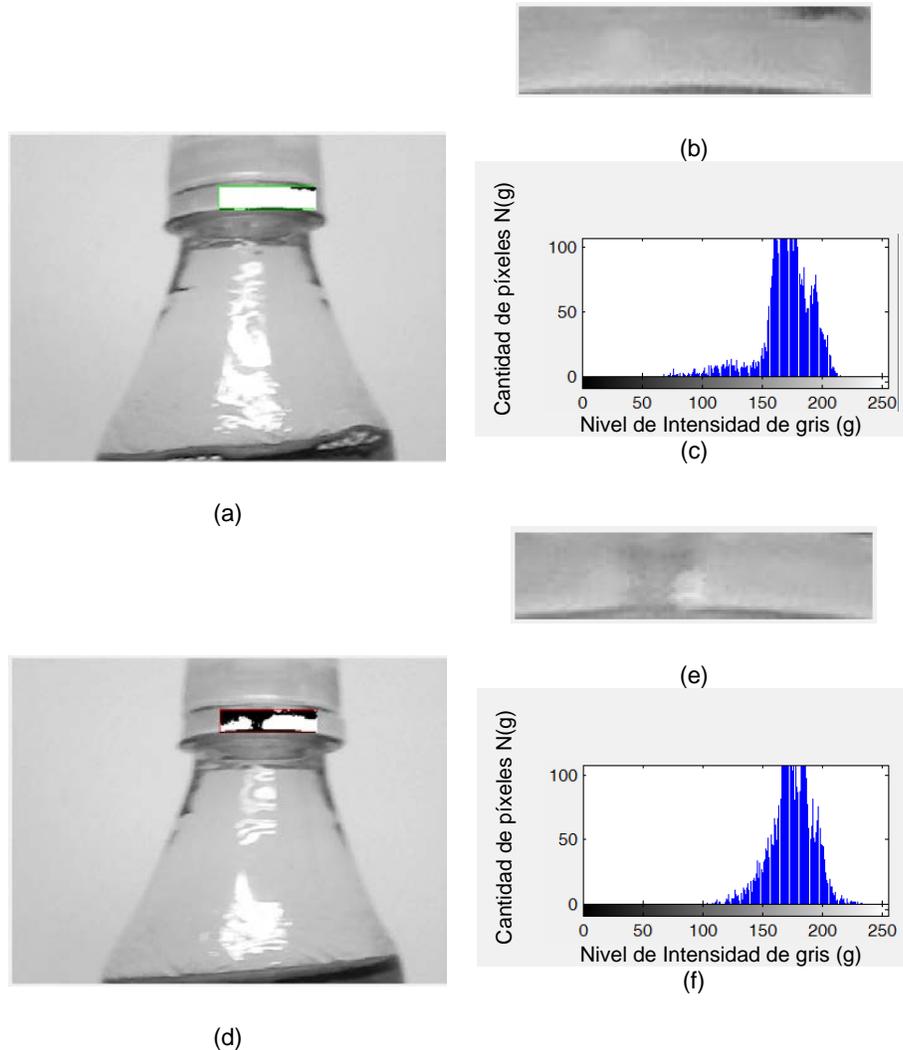


Figura 5. Imperfecciones en el arillo de seguridad, (a) Arillo completo, (b) Región de interés en (a), (c) histograma de (b), (d) Arillo fracturado, (e) Región de interés en (d), (f) histograma de (e).

Además de las anteriores otro defecto común en estos procesos es la ausencia de la tapa rosca en el envase (figura 6), donde las diferencias en la distribución de intensidades en la región son evidentes y por lo cual la herramienta de luminosidad es suficiente para inspeccionar esta característica.

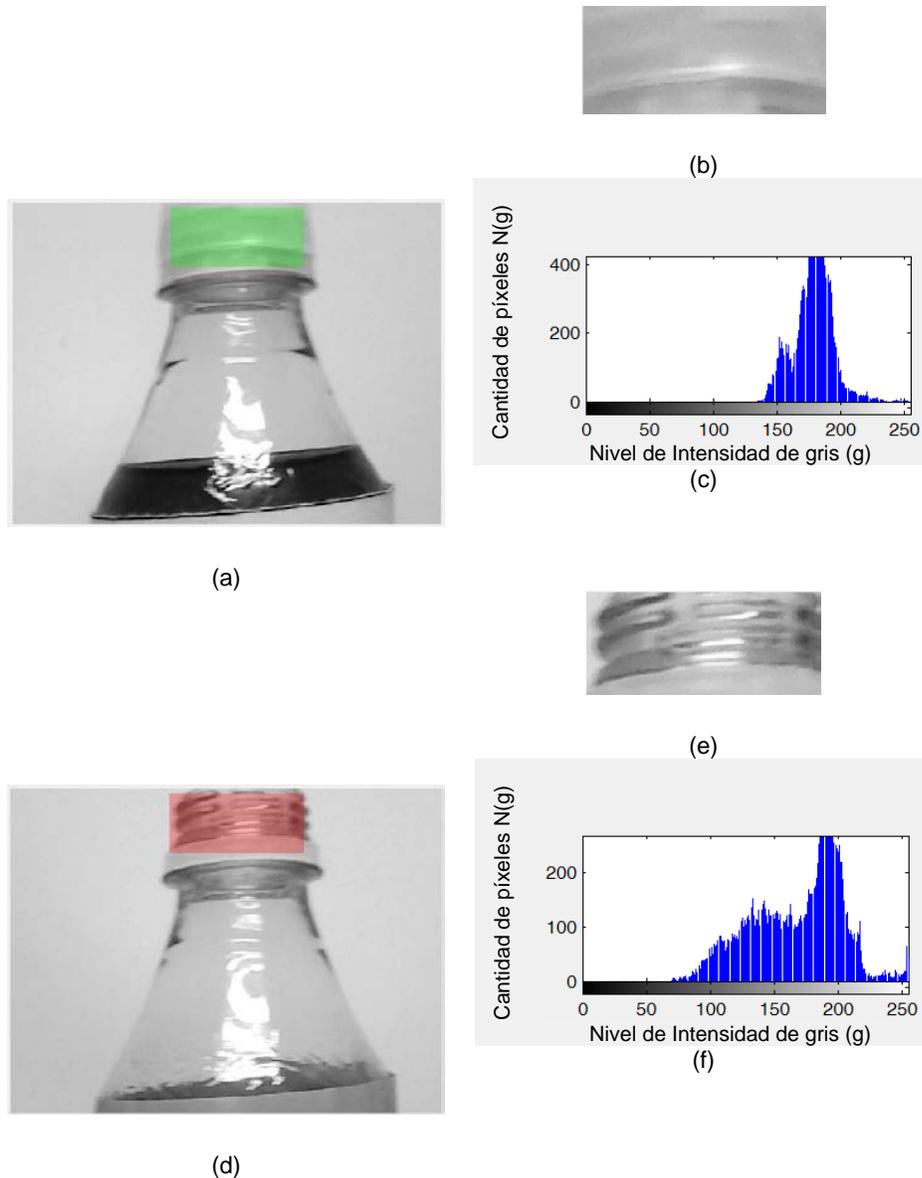


Figura 6. Presencia de tapa rosca, (a) Tapa rosca, (b) Región de interés en (a), (c) histograma de (b), (d) Tapa rosca ausente, (e) Región de interés en (d), (f) histograma de (e).

Las figuras 6c y 6f muestran un cambio de luminosidad evidente en las regiones de interés 6a y 6d, por lo que la detección de la tapa rosca es sencillo de definir.

Con respecto a si el envase fue bien enroscado y sellado las luminosidades en esa región para el caso de un envase bien sellado y uno con deficiencias son muy similares, ya que aunque difieren un poco sus histogramas, la luminosidad varía por unas pocas unidades, y donde la herramienta de recuento de píxeles oscuros da una diferencia más apreciable, como se puede apreciar en la figura 7.

Como se puede apreciar en las figuras 7c y 7f hay una variación en la luminosidad de las regiones de estudio, sin embargo esta es muy pequeña por lo que al usar esta herramienta pudiera producir rechazos falsos en otras inspecciones y por lo cual es preferible el uso de la herramienta de recuento de píxeles o blob, dado que la umbralización en las zonas de interés producen una variación en la cantidad de píxeles blancos y oscuros mucho mayor.

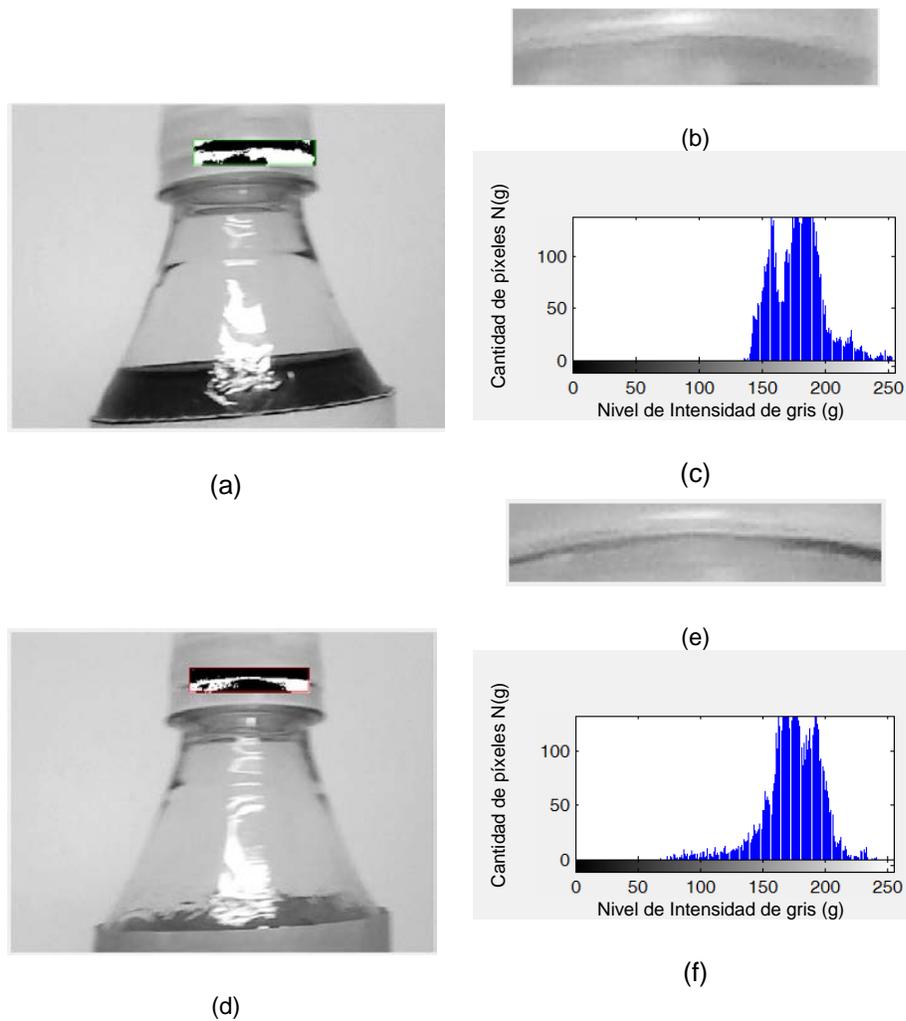


Figura 7. Imperfecciones en enfocado, (a) Enfocado adecuado, (b) Región de interés en (a), (c) histograma de (b), (d) Enfocado ausente, (e) Región de interés en (d), (f) histograma de (e).

Un sistema de inspección por cámara puede ser utilizado a conveniencia sobre un campo de visión acorde a requerimientos específicos, por ejemplo para la inspección de defectos en etiquetas como posición de la etiqueta, presencia de desviaciones, arrugas, burbujas o daños [8].

Un ejemplo de defecto puede ser una etiqueta mal impresa colocada sobre el envase, donde el corrimiento de tinta produce un cambio en la cantidad de píxeles en una región. En la figura 8a y 8d se muestran el incremento de píxeles oscuros sobre una región específica y mostrando también que sus histogramas 8c y 8f no presentan una diferencia clara, por lo que la mejor herramienta para este caso es Recuento de Píxeles.

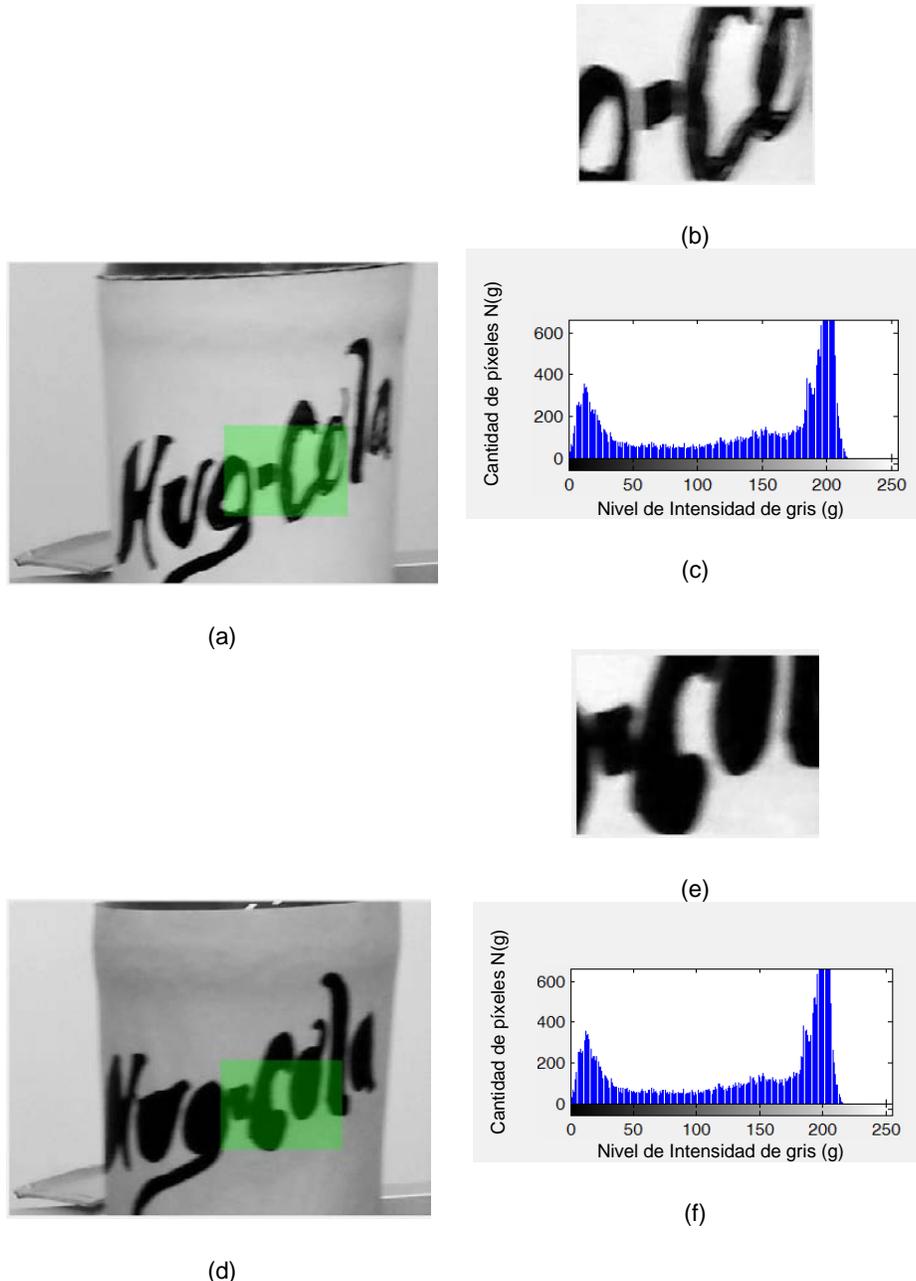


Figura 8. Defectos en etiqueta, (a) Etiqueta correcta, (b) Región de interés en (a), (c) histograma de (b), (d) Etiqueta con defecto de impresión, (e) Región de interés en (d), (f) histograma de (e).

4. Implementación de prototipo e interfaz de usuario.

El prototipo consiste en una banda transportadora la cual traslada los envases hacia una zona de inspección conformada por una webcam común y un sensor de proximidad fotoeléctrico E18-D50NK el cuál actúa como disparador externo de la cámara (figura 9), permitiendo la captura de la imagen del envase cuando este pasa por la zona de inspección para su inmediata revisión.



Figura 9. Sistema de inspección de envases.

Para llevar el control del sistema, así como la adquisición de imagen, configuración de herramientas de detección, análisis de imagen y visualización de resultados de inspección, se implementó un GUI en Matlab (figura 10).

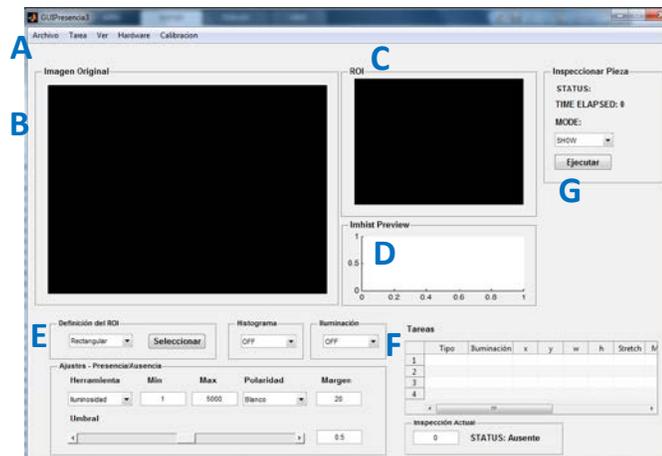


Figura 10. Interfaz de usuario para inspección de envases a través de un GUI.

La interfaz de usuario se puede apreciar en la figura 10 y está conformada por las siguientes secciones: A, sección donde el usuario puede cargar una imagen, guardar y cargar tareas desde disco duro; B, sección de visualización de imágenes adquiridas; C, sección que permite ver con mayor acercamiento una región de interés establecida en A; D, visualización del histograma de la región mostrada en C; E, sección de configuración de parámetros en las herramientas; F tabla de memorización de atributos configurados en las herramientas; G, botón de ejecución para verificación de todas las características programadas en F.

A partir de los conceptos previos, para la obtención de las tolerancias para rechazo de los productos NO OK, se calibran cada herramienta de visión capturando una imagen patrón y registrando sus valores de luminosidad y cantidad de píxeles, tal que a partir de esta medición se establezca un mínimo y un máximo permisible como tolerancias, en este caso las tolerancias que se establecieron son simétricas, por lo que la medición sobre la imagen patrón proporcionó la media de dichas tolerancias. Para la característica de recuento de píxeles se configura adicionalmente el parámetro de polaridad, configurándolo a conveniencia dependiendo de la cantidad de píxeles oscuros o brillantes aparezcan en la imagen.



Tabla 1. Herramientas de inspección y tolerancias para cada característica.

Característica	Herramienta	Tolerancia		Polaridad
		Min	Max	
Nivel de líquido	Luminosidad	120	150	-
Enroscado Parcial	Luminosidad	165	180	-
Arillo de seguridad Roto	Recuento de Pixeles	3000	5000	Blanco
Tapa rosca Ausente	Luminosidad	175	181	-
Enroscado Ausente	Recuento de Pixeles	3000	5000	Negro
Defecto de impresión en etiqueta	Recuento de Pixeles	10000	12000	Negro

Para la verificación de la funcionalidad del prototipo se inspeccionaron seis defectos en envases, cada herramienta configurada a tolerancias mínima y máxima para su detección, tal y como se muestra en la tabla I.

4. Resultados.

La implementación del programa en Matlab fue realizada sobre una laptop con procesador Intel Core 2 Duo a una velocidad de 2.53 GHz bajo un sistema operativo de 32 bits y memoria RAM de 4GB. El tiempo de procesamiento obtenido para la inspección de defectos en envase fue de 0.3 segundos. En comparativa con el software In Sight Explorer tiene una desventaja de un 1000 a 1 en velocidad. Sin embargo, posee la ventaja de generar visualizaciones de resultados parciales, permitiendo una conceptualización más firme del procesamiento que implica la detección de un defecto y un mejor ajuste, además de que el software generado no posee un límite en número de inspecciones.

La herramienta de inspección generada en Matlab, se encuentra en desarrollo, por lo que la validación y comparativa con el software industrial se encuentran en proceso.

5. Conclusiones.

El desarrollo de algoritmos para la detección de defectos en procesos industriales a través del software Matlab permite una comprensión de la importancia de variación de parámetros en procesos como umbralización, segmentación, operadores morfológicos, detección de líneas, etc., permitiendo una conceptualización más adecuada a través de resultados parciales y finales en procesos de inspección visual.

La interfaz de usuario generada en este trabajo permitió tener una herramienta no solo para la inspección de envases, sino que brinda una herramienta aplicable a más procesos, ya que se generalizó el concepto de cada herramienta de un sistema de visión industrial.



Referencias

- [1] Veza I., Gjeldum N., Celent L. “Lean Manufacturing Implementation Problems in Beverage Production Systems”, *International Journal of Industrial Engineering and Management (IJIEM)*, Vol. 2 No 1, 2011, pp. 21-26.
- [2] Dennis P. “Lean Production Simplified”, Editorial CRC Press, USA, pp.95, 2007.
- [3] Visión Artificial aplicada a la industria,
http://www.jcee.upc.es/JCEE2010/pdf_ponencias/PDFs/25_11_10/INFAIMON-Vision%20artificial.pdf
- [4] In-Sight® Explorer (Versión 4.9.3) [software]. (2004). Cognex Corporation.
- [5] Pajares G., De la Cruz J. “Visión por Computador – Imágenes digitales y aplicaciones”, Editorial Alfaomega Ra-Ma, México. pp. 88 – 89, Segunda Edición, 2008.
- [6] Gonzalez R. “Digital Image Processing Using Matlab”, Editorial Woods & Eddins, USA, pp. 381-383, Segunda Edición, 2009.
- [7] Burger W., Burge M. “Principles of Digital Image Processing”, Editorial Springer, UK, pp. 63-65, 2009.
- [8] Inspección de envases de plástico,
http://www.mt.com/mx/es/home/products/Product-inspection_1/CI_Vision/plastic_containerinspection.html



Instrumentación y evaluación estructural del puente Río Papaloapan durante los trabajos de mantenimiento preventivo y correctivo

Hernández Figueroa Jorge Alberto¹, Quintana Rodríguez Juan Antonio¹, Crespo Sánchez Saúl Enrique¹, Gasca Zamora Héctor Miguel¹, Martínez Trujano Luis Álvaro¹.

¹Instituto Mexicano del Transporte (IMT), Km 12+000, Carretera Estatal No. 431 "El Colorado Galindo", Parque Tecnológico San Fandila, Mpio. Pedro Escobedo, Edo. Querétaro, C.P.76703, Tel (442)2.16.97.77

Resumen

La necesidad por mover mercancías y personas hace necesario la construcción de obras para el transporte en nuestro país, como carreteras y puentes al mismo tiempo se requiere de herramientas tecnológicas que ayuden a preservar en buen estado y a evaluar la integridad de la infraestructura carretera. Actualmente existen técnicas y tecnologías para la preservación de dichas obras, como el monitoreo estructural. Una de las obras importantes del país es el puente atirantado Río Papaloapan, el cual el Instituto Mexicano del Transporte a puesto especial atención debido a las fallas que ha presentado durante su vida de operación. Actualmente cuenta con un sistema de monitoreo remoto que sirve para conservar la integridad estructural y garantizar la seguridad de los usuarios. Este trabajo hace referencia a los procedimientos utilizados para la evaluación estructural de las tensiones de los tirantes de este puente, durante los trabajos de mantenimiento preventivo y correctivo al cual fue sometido.

Palabras clave: Instrumentación, acelerómetros, Sensores Piezoeléctricos, Monitoreo Estructural, tensiones, puente atirantado.

1. Introducción

La construcción de obras de infraestructura para el transporte en nuestro país, como carreteras, puentes, tuneles y puertos han estado en constante desarrollo y crecimiento, debido a la necesidad de movilizar mercancías y personas, y a la promoción del progreso del país. Por tal motivo es importante tener procedimientos y herramientas que permitan mantener en buen estado la infraestructura y conocer su condición estructural. En la actualidad, el uso de técnicas y tecnologías para la conservación de la infraestructura es cada vez más frecuente, gracias al surgimiento de campos multidisciplinarios como el monitoreo de la integridad estructural (Structural Health Monitoring, SHM), el cual tiene como objetivo verificar el comportamiento in-situ de sistemas estructurales, para evaluar el desempeño estructural ante distintas cargas de servicio, detectar daño o deterioro y predecir vida útil remanente de las estructuras

Cabe mencionar que cualquier estructura sufre deterioro natural por operación y degradación de los materiales como en los casos de fenómenos de fatiga, corrosión, agrietamiento, entre otros. Aunado a esto la creciente demanda por tener mayor capacidad de carga en la infraestructura de nuestro país hace necesario conocer la integridad de las estructuras en todo momento para conocer las necesidades de mantenimiento y el posible reacondicionamiento de elementos estructurales para garantizar la seguridad de los usuarios.

Una de las estructuras importantes del país en infraestructura vial, es el puente Río Papaloapan. El puente se localiza en la autopista la Tinaja-Acayucan, en el estado de Veracruz, fue construido en 1994, es de tipo atirantado, con un claro máximo de 203 m y una longitud total de 407 m. El puente tiene 112 cables distribuidos en 8 semi-arpas con 14 cables cada uno. Para simplificar la identificación de las semi-arpas, éstas son etiquetadas de la 1 a la 8 según se indica en la figura 2.1 y los cables son numerados del 1 al 14, comenzando del más corto al más largo por semi-arpa [1].

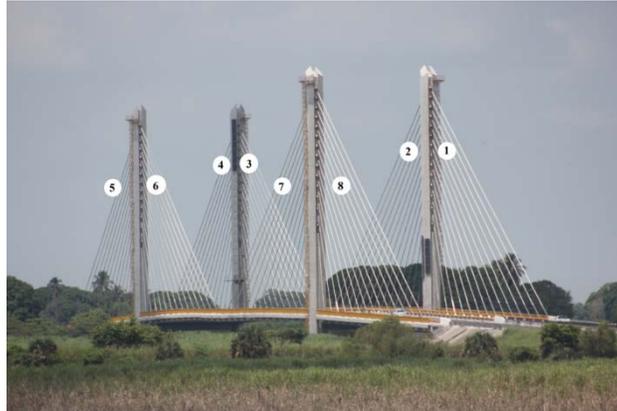
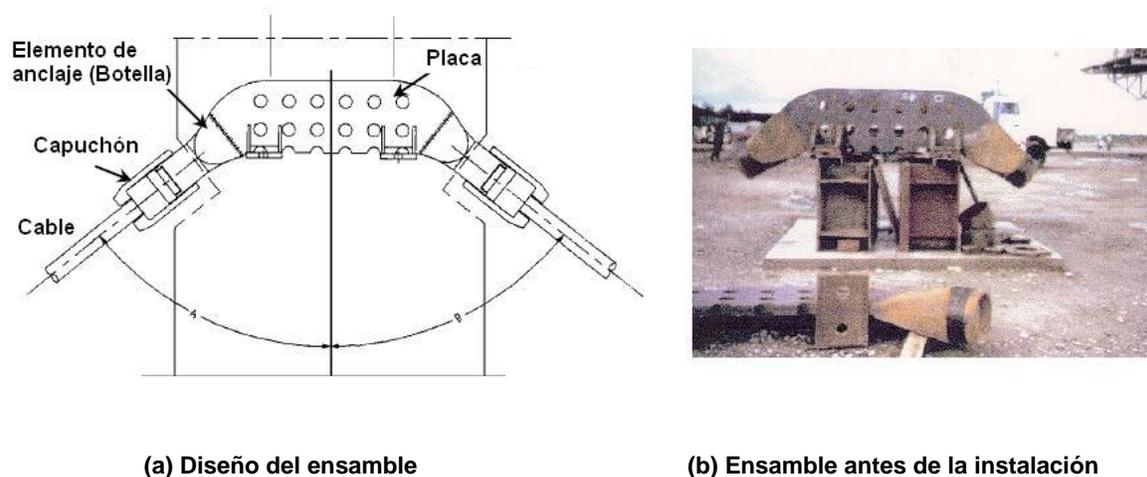


Figura 1. Semi-arpas del puente atirantado Río Papaloapan.[1]

El diseño único del sistema de anclaje superior de los cables fue desarrollado por Astiz y consiste de una placa de acero soldada al elemento de anclaje, el cual es de forma cilíndrica en un lado donde va enroscado el capuchón que sostiene el cable, y plano del otro lado en donde se une por soldadura a la placa (figura 2) [2].



(a) Diseño del ensamble

(b) Ensamble antes de la instalación

Figura 2. Ensamble del anclaje superior utilizado en el sistema de cables del puente Río Papaloapan [2]

En junio de 2015 se presentó la falla del elemento de anclaje superior del tirante 1 de la semi-arpa 5. Después de un análisis de falla y estudios detallados se concluyó que el origen de la falla se debió a un proceso de soldadura inadecuado [3]. A partir de los estudios realizados se desarrollaron una serie de actividades para la rehabilitación del puente, para la detección de elementos



estructurales con las mismas características al que falló para y para la realización de mantenimiento preventivo.

2. Antecedentes.

El puente Río Papaloapan fue construido en 1994 y puesto en servicio en 1995. A principio del año 2013 se llevó a cabo la instrumentación del puente, empleando sensores de fibra óptica tipo FBG.

El sistema de monitoreo permanente instalado permitió realizar una serie de estudios para evaluar los cambios en la tensión en los tirantes, la deformación y esfuerzos en las vigas principales y torres y analizar el efecto de la falla sobre el comportamiento estructural del puente. Los datos del sistema de monitoreo en complemento con la información de un modelo de elemento finito permitieron evaluar alternativas de reforzamiento provisional en la zona de falla para suplir la carga del tirante que falló mediante una estructura de apuntalamiento inferior [3].

La empresa Freyssinet de México S. A. de C. V., diseñó un sistema de apuntalamiento, el cual se implementó el día 22 de septiembre de 2015. Durante los trabajos de puesta en servicio de este sistema temporal, se realizó un monitoreo de las tensiones de los 4 tirantes contiguos al que falló y de los sensores cercanos a la zona de falla con el objetivo de controlar las etapas del proceso de apuntalamiento y evaluar el efecto final del sistema provisional sobre el puente [3].

Como parte de las actividades para detectar elementos de anclaje con la misma problemática al que falló, durante los primeros meses del 2016 se realizaron una serie de estudios para inspeccionar los 111 elementos de anclajes restantes utilizando una técnica por emisiones acústicas [4]. Estos estudios permitieron identificar que los elementos de anclaje del tirante 6 de la semi-arpa 4, el tirante 6 de la semi-arpa 3, el tirante 6 de la semi-arpa 5 y el tirante 2 de la semi-arpa 8 tienen características similares al de la falla [4].

En Junio del 2016 se inició la rehabilitación del tirante 1 de la semi-arpa 5, retirando en una primera etapa el puntal y después tensado el tirante mencionado: en este proceso fue importante monitorear en tiempo real las tensiones de los tirantes contiguos para ajustar la tensión a una condición similar a antes de la falla. Posteriormente se inició el proceso de inspección no destructiva utilizando líquidos penetrantes y ultrasonido de los elementos de anclaje de los tirantes 6 de la semi-arpa 5 y del 2 de la semi-arpa 7 para corroborar los datos obtenidos de las pruebas realizadas por emisiones acústicas, cabe mencionar que para esta etapa del programa fue necesario destensar ambos tirantes.

3. Sistema de monitoreo estructural.

El monitoreo estructural tiene como principal objetivo verificar el comportamiento estructural in-situ de una estructura de manera precisa y eficiente, para evaluar su desempeño bajo distintas cargas de servicio, para detectar daño o deterioro, y determinar así, su condición estructural [5]. La integración completa de diversos dispositivos de detección y sistemas tales como: instrumentación virtual, sensores, sistemas adquisición de datos, procesamiento de datos, comunicación y detección de daño, hacen posible la conjunción de un sistema de monitoreo estructural.

Para el caso de monitoreo estructural del puente Río Papaloapan previo y durante la rehabilitación se utilizaron dos diferentes tecnologías de instrumentación, por un lado el sistema de monitoreo basado en sensores de fibra óptica *Fiber Bragg Grating* (FBG) [5] y por otra parte un sistema temporal local con un arreglo de acelerómetros piezoeléctricos.

El sistema de monitoreo de sensores FBG de fibra óptica está formado por 24 sensores de deformación para concreto, 24 acelerómetros, 8 inclinómetros, 5 sensores de temperatura, un sensor de desplazamiento [1]. Este sistema adquiere los datos de manera permanente. Figura 3.

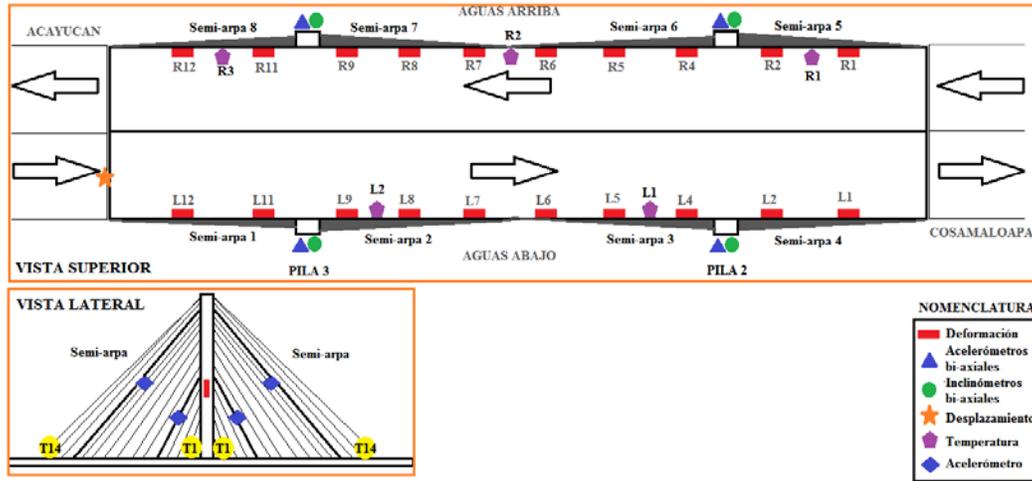


Figura 3. Diagrama de instrumentación de sensores FBG del Puente Río Papaloapan.

Por otro lado con el fin de tener mayor detalle del comportamiento de los parámetros estructurales durante los trabajos de rehabilitación se integró un sistema de monitoreo temporal para determinar las tensiones de los tirantes contiguos al tirante 1 de la semi-arpa 5, ya que actualmente el sistema de monitoreo no tiene instrumentados todos los tirantes de manera permanente. Este sistema se integró con dos objetivos principales. Llevar un monitoreo de las tensiones de todos los tirantes del puente durante las diferentes etapas de inspección y monitorear las tensiones en “tiempo real” en la rehabilitación para llevar las tensiones de todos los tirantes a un estado previo a la falla. En este sistema se integró de 4 acelerómetros piezoeléctricos, una tarjeta de adquisición de datos y una PC.

4. Modelo matemático para la determinar la tensión en un tirante.

Partiendo de la frecuencia fundamental de un tirante que vibra, y considerando que puede ser medida en campo por medio de la respuesta dinámica registrada por los acelerómetros, se puede hacer una estimación de la tensión usando un modelo lineal. Este modelo se basa en la relación que existe entre la frecuencia natural; la masa por unidad de longitud del tirante; la longitud; y la tensión. “La desventaja fundamental es que no toma en cuenta efectos no lineales, como los grandes desplazamientos ni la inclinación que el tirante puede tener, como es el caso de los puentes atirantados” [6].

La ecuación que describe la vibración libre de un tirante o una cuerda con una masa por unidad de longitud m sujeta a una tensión T , es la siguiente [7]:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{m}{T} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

Resolviendo la ecuación anterior y haciendo un análisis modal para determinar las frecuencias naturales se obtiene la siguiente relación:



$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (2)$$

Donde n , es el número asociado al modo de vibrar, l es la longitud del cable, T es la tensión del cable y m es la masa por unidad de longitud del cable. Por tanto, la tensión en función del primer modo de vibrar se determina de la siguiente forma:

$$T = m(2lf_1)^2 \quad (3)$$

En algunos casos no es posible identificar la frecuencia del primer modo, en estos casos se determina utilizando las frecuencias de los modos superiores de vibrar, mediante la relación:

$$\bar{f}_1 = \frac{\sum_{i=2}^n f_i}{\sum_{i=2}^n i} \quad (4)$$

Para la estimación de la tensión se pueden ignorar los efectos que se consideran en un modelo no lineal, ya que estos efectos no lineales que sufren los tirantes hacen que el cálculo por modelación lineal genere un error cercano al 1% de la tensión axial en los mismos [6].

5. Elementos del sistema de monitoreo estructural para determinar las tensiones en los tirantes.

Para el monitoreo en “tiempo real” se utilizaron cuatro acelerómetros de alta sensibilidad marca Vibra Metrics modelo CBM-2000 (figura 5) con una sensibilidad de 1500 mV/g en un rango de frecuencias de 0.1 Hz a 500 Hz, estos acelerómetros son idóneos para el análisis espectral a bajas frecuencias por su sensibilidad y ancho de banda en el cual trabajan para poder visualizar los modos de vibrar del tirante. Estos acelerómetros necesitan estar conectados a un acondicionamiento de señales para poder leer dichas señales en una tarjeta de adquisición que esta su vez se manda la información a una PC con un software que interprete los datos. Para la etapa de acondicionamiento de señales se usó el acondicionador Kistler de cuatro canales modelo Piezotron. Éste se conecta por medio de cables coaxiales RG58 a una tarjeta de adquisición de datos National Instruments NI-6341 BNC. La adquisición de datos se estableció a una frecuencia de muestreo de 200Hz, de acuerdo al criterio de Nyquist se puede obtener un espectro de frecuencias de 0 a 100Hz por medio de la transformada rápida de Fourier (FFT). Estos equipos se montaron en un gabinete metálico NEMA para proteger los equipos de las inclemencias meteorológicas (figura 4).

5.1 Desarrollo de la plataforma de adquisición.

Para el registro de la respuesta dinámica de los acelerómetros se diseñó una plataforma que permite monitorear las señales de cada uno de los sensores instalados y analizarlas para brindar mayor información acerca de las tensiones registradas en tiempo real. Dicha plataforma cumple con los siguientes objetivos:

- a) Adquisición y registro de las respuestas dinámicas.
- b) Post-procesamiento de las respuestas dinámicas.
 - Calcular el espectro de frecuencias usando la FFT.
 - Identificar los modos de vibrar del tirante.
 - Calcular la frecuencia fundamental del tirante.
 - Calcular la tensión a partir de la frecuencia fundamental.

- c) Visualizar por medio de indicadores los niveles de tensión del tirante.
- d) Registrar la tensión del tirante.



Figura 4. Elementos del sistema de adquisición de datos.



Figura 5. Acelerómetros piezoeléctricos CBM2000.

La adquisición de las señales para el sistema de monitoreo de los sensores se desarrolló a través de un sistema basado en LabView, el cual es un software de desarrollo para el análisis e instrumentación que se basa en lenguaje gráfico, el cual cuenta con herramientas para el cálculo de la FFT, la adquisición y procesamiento de señales. Estas ventajas que ofrece LabVIEW nos permitió desarrollar un instrumento virtual, el cual se encarga de la adquisición, procesamiento y almacenamiento de la información.

En la figura 6, se muestra un despliegue de la interfaz de monitoreo en tiempo real desarrollada para la adquisición y visualización de las señales de estos sensores.

La interfaz muestra en la parte superior izquierda la señal de aceleración, a la derecha el espectro de frecuencias calculado en tiempo real con una resolución de frecuencia de 0.05 Hz. En la parte inferior izquierda un indicador de caratula mostrando la tensión en toneladas del tirante y por ultimo controles e indicadores para identificar el modo de vibración del tirante.

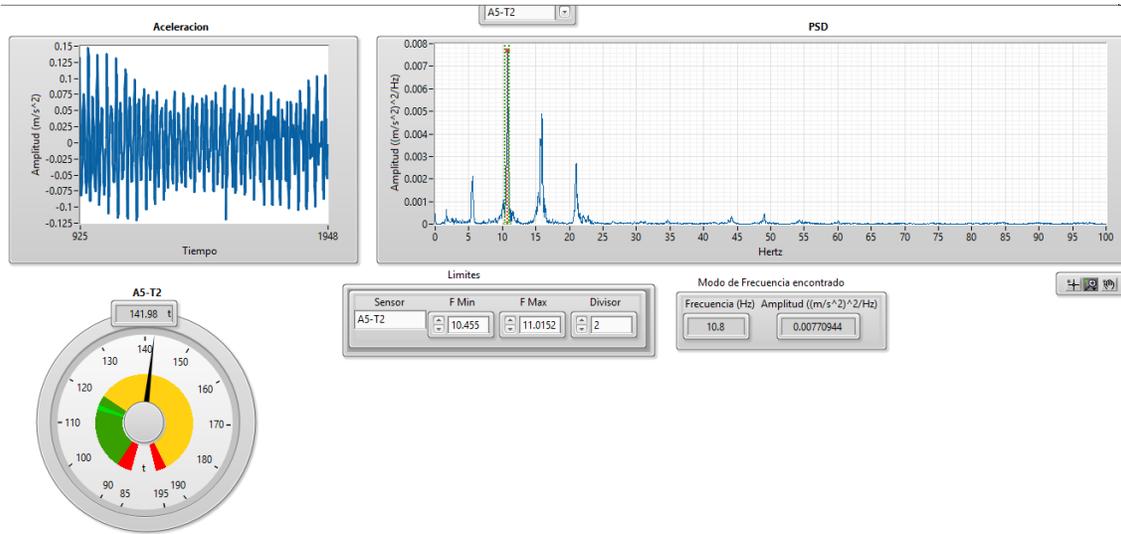


Figura 6. Interfaz de usuario para el monitoreo de tensiones.

5.2 Límites de carga.

Cada tirante instrumentado cuenta con un indicador de caratula en el cual se representan diferentes zonas, con la intención de tener referencia de la tensión en todo momento y no llegar a límites críticos y además proporcionar información durante todo el proceso de rehabilitación para dejar las tensiones al estado previo a la falla. Las zonas se identifican de la siguiente manera y se representan con indicadores como el mostrado en la figura 7:

- Verde claro: Tensión antes de la falla.
- Verde oscuro: Límites mínimo y máximo de proyecto
- Amarillo: Límite máximo de diseño (45% de la carga máxima de ruptura de cada tirante)]
- Roja: Excede límites máximo de tensión o están por debajo de la tensión mínima de proyecto.
-

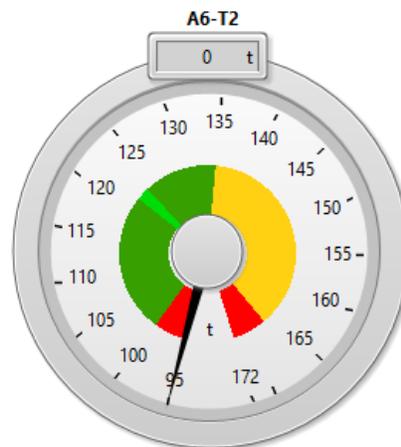


Figura 7. Indicador de caratula con los límites de carga.

5.3 Integración de la plataforma

La pantalla principal del software desarrollado para medir las tensiones de los tirantes contiguos se puede apreciar en la figura 8: La pantalla muestra simultáneamente la tensión de por lo menos 5 tirantes (indicadores de la parte superior) y adicionalmente la plataforma es capaz de comunicarse con el sistema de monitoreo permanente a través de TCP/IP (sensores de fibra óptica FBG), midiendo de manera simultánea la deformación asociada a los extensómetros de la zona que se estuvo interviniendo.



Figura 8. Vista principal de la plataforma de monitoreo de tensiones.

6. Rehabilitación de Puente Río Papaloapan

La rehabilitación del puente, en especial las inspecciones de los sistemas de anclaje de los tirantes y el monitoreo de tensiones se ha realizado en diferentes etapas.

- Etap 1. Monitoreo de tensiones durante el desmontado del puntal.
- Etap 2. Monitoreo de tensiones durante el tensado de A5-T1.
- Etap 3. Monitoreo de tensiones durante el destensado de A7-T2.
- Etap 4. Monitoreo de tensiones durante el tensado de A5-T6.

7. Etapa 1. Monitoreo de tensiones durante el desmontado del puntal.

En la etapa 1 del monitoreo de tensiones para retirar el puntal se instrumentaron los tirantes A5-T2, A5-T3, A6-T1 y A6-T2 (En esta condición no existe aún el tirante A5-T1), como se muestra en la figura 9. Esta etapa consistió básicamente en retirar los neoprenos que existían entre el puntal y el tablero del puente, utilizando actuadores hidráulicos y dejando condiciones similares después a la falla del tirante. En total la deflexión del tablero del puente en esa zona fue alrededor de 4 cm, lo que provocó el aumento de la tensión en los tirantes contiguos al tirante A5-T1, Los resultados pueden observarse en la Tabla 1.

Los datos obtenidos de esta primera etapa durante la rehabilitación, reflejan que el tirante A5-T2 tiene alrededor 15 ton arriba del límite máximo lo cual representa el 48% de la carga máxima a la ruptura y mientras que los tirantes A5-T3, A6-T1 y A6-T2 están por debajo sus límites de diseño (valores menores al 45% de la carga máxima a la ruptura).

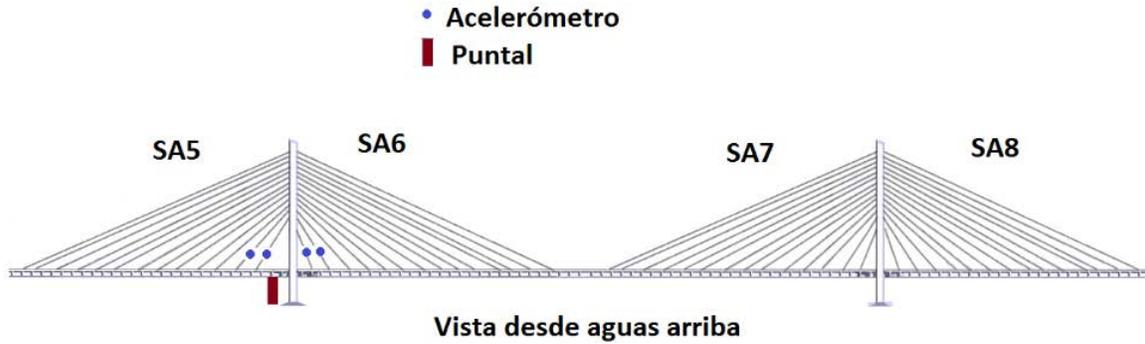


Figura 9. Instrumentación durante el destensado en A5-T1

Tabla 1. Resultados de la Etapa 1.

Desmontado del puntal en A5-T1						
Valores del monitoreo			Valores de referencia			
Tirantes	Tensiones Iniciales (ton)	Tensiones Finales (ton)	Mínimas de proyecto (ton)	Máximas de proyecto (ton)	Máxima de diseño (ton)	Antes de la Falla (ton)
A5-T2	176	205	91	121	190.63	116.11
A5-T3	180	193	132	169	214.46	148.9042
A6-T1	230	258	161	218	262.12	180.8152
A6-T2	131	135	100	135	166.8	122.682

7.1 Etapa 2. Monitoreo de tensiones durante el tensado de A5-T1.

Después de haber retirado el puntal se procedió a izar y tensar el cable en A5-T1, para esta etapa se instrumentaron los tirantes A5-T2, A5-T3, A6-T1 y A6-T2 (Debido a que en ese momento se estaba colocando el tirante A5-T1 no fue posible instrumentarlo). El arreglo de sensores se muestra en la figura 10.

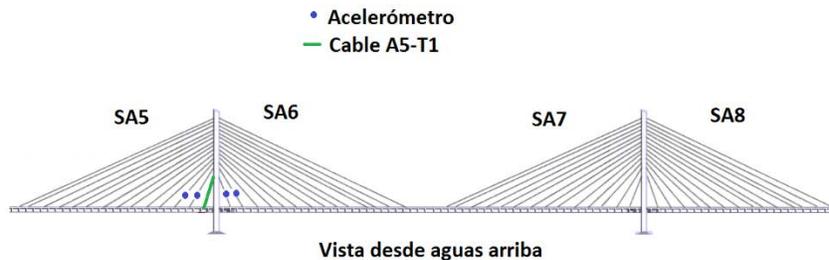


Figura 10. Instrumentación durante el tensado en A5-T1

Los datos obtenidos de la segunda etapa (Tabla 2) reflejan que en promedio se necesita recuperar la tensión del tirante A5-T1 9.57% para obtener las tensiones similares a la condición antes de la falla.

Tabla 2. Resultados de la Etapa 2.

Tensado de A5-T1							
Valores del monitoreo			Valores de referencia				
Tirantes	Tensiones Iniciales (ton)	Tensiones Finales (ton)	Mínimas de proyecto (ton)	Máximas de proyecto (ton)	Máxima de diseño (ton)	Antes de la Falla (ton)	Tensión faltante a recuperar la condicione antes de la falla (ton)
A5-T2	205	140	91	121	190.63	116.11	23.89
A5-T3	193	160	132	169	214.46	148.9042	11.0958
A6-T1	258	196	161	218	262.12	180.8152	15.1848
A6-T2	135	125	100	135	166.8	122.682	2.318

7.2 Etapa 3. Monitoreo de tensiones durante el destensado de A7-T2.

Como parte de la rehabilitación e inspección de los elementos de anclaje de los tirantes del puente, se decidió inspeccionar el elemento de anclaje en A7-T2. Para lo cual fue necesario monitorear las tensiones durante el proceso de destensado de dicho tirante. En esta etapa se instrumentaron los tirantes A7-T1, A7-T3, A8-T1 y A8-T2, como se muestra en la figura 11.

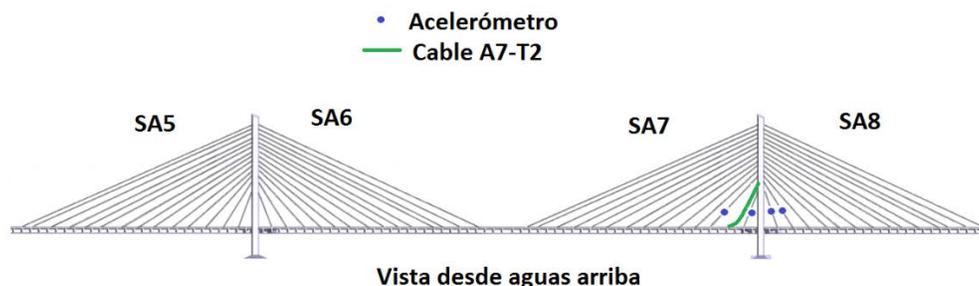


Figura 11. Instrumentación durante el destensado en A5-T1

Los datos obtenidos de la etapa 3 (Tabla 3), indican que las cargas se redistribuyen en los tirantes contiguos, haciendo que el tirante A7-T2 tenga una carga arriba del límite máximo de diseño que representa el 46.6 % de la carga máxima a la ruptura.

Tabla 3. Resultados de la Etapa 3

Destensado en A7-T2						
Valores del monitoreo			Valores de referencia			
Tirantes	Tensiones Iniciales (ton)	Tensiones Finales (ton)	Mínimas de proyecto (ton)	Máximas de proyecto (ton)	Máxima de diseño (ton)	Antes de la Falla (ton)
A7-T1	227	272	161	218	262.12	228.1371
A7-T3	176	199	140	176	214.46	168.8813
A8-T1	201	209	187	241	274.03	199.976
A8-T2	121	121	91	121	190.63	121.9164

7.3 Etapa 4. Monitoreo de tensiones durante el destensado de A5-T6.

Para la etapa 4 del monitoreo de tensiones, se destensó el tirante A5-T6 para realizar la inspección de líquidos penetrantes y de ultrasonido. En esta etapa no se pudo hacer el monitoreo en “tiempo real” de las tensiones, sin embargo se realizó una medición global de las tensiones del puente.

8. Resultados globales.

Después de cada etapa de monitoreo en tiempo real y cada mes después de la falla del tirante A5-T1 se realizaron mediciones de las tensiones de todos los tirantes del Puente Río Papaloapan.

Para cumplir con este objetivo se utiliza un dispositivo portátil de un solo canal (figura 12) el cual calcula la FFT, por lo que solo es necesario realizar el análisis modal para el cálculo de la tensión. El procedimiento consiste en montar un acelerómetro sobre el tirante, de igual modo que las mediciones realizadas en tiempo real. En la figura 12 se muestra el equipo y el arreglo realizado en campo.



Figura 12. Montaje del acelerómetro sobre el tirante (izquierda) y sistema portátil de mediciones de vibraciones (derecha).

El resultado de las mediciones globales se puede apreciar en la figura 13, el lado aguas arriba del puente (lado con mayor variaciones de tensión durante la rehabilitación) es donde se pueden observar los cambios de tensión en las distintas etapas de la rehabilitación.

Las tensiones registradas indican que la tensión final del tirante A5-T1 aun o está en la tensión previa a la falla, y que necesita realizar un ajuste, los datos indican que esta promedio 9.57% debajo de la tensión que se requiere, esto se puede apreciar en la figura 14. Este grafico representa las tensiones contiguas al tirante que fallo, están en orden cronológico, siendo el evento 1 la tensión registrada antes de la falla. El evento 2 la tensión registrada después de la falla donde se aprecia el aumento súbito de la carga en todos los tirantes contiguos (A5-T2, A5-T3, A6-T1 y A6-T2). El evento 3 apuntalamiento en A5-T1, disminuyendo la tensión aliviada por el puntal. El desmontaje del puntal representado por el evento 4 aumentando la tensión a valores cercanos después de la falla. Por último los eventos 5 y 6 que representan los valores de carga del tensado del nuevo cable en A5-T1.

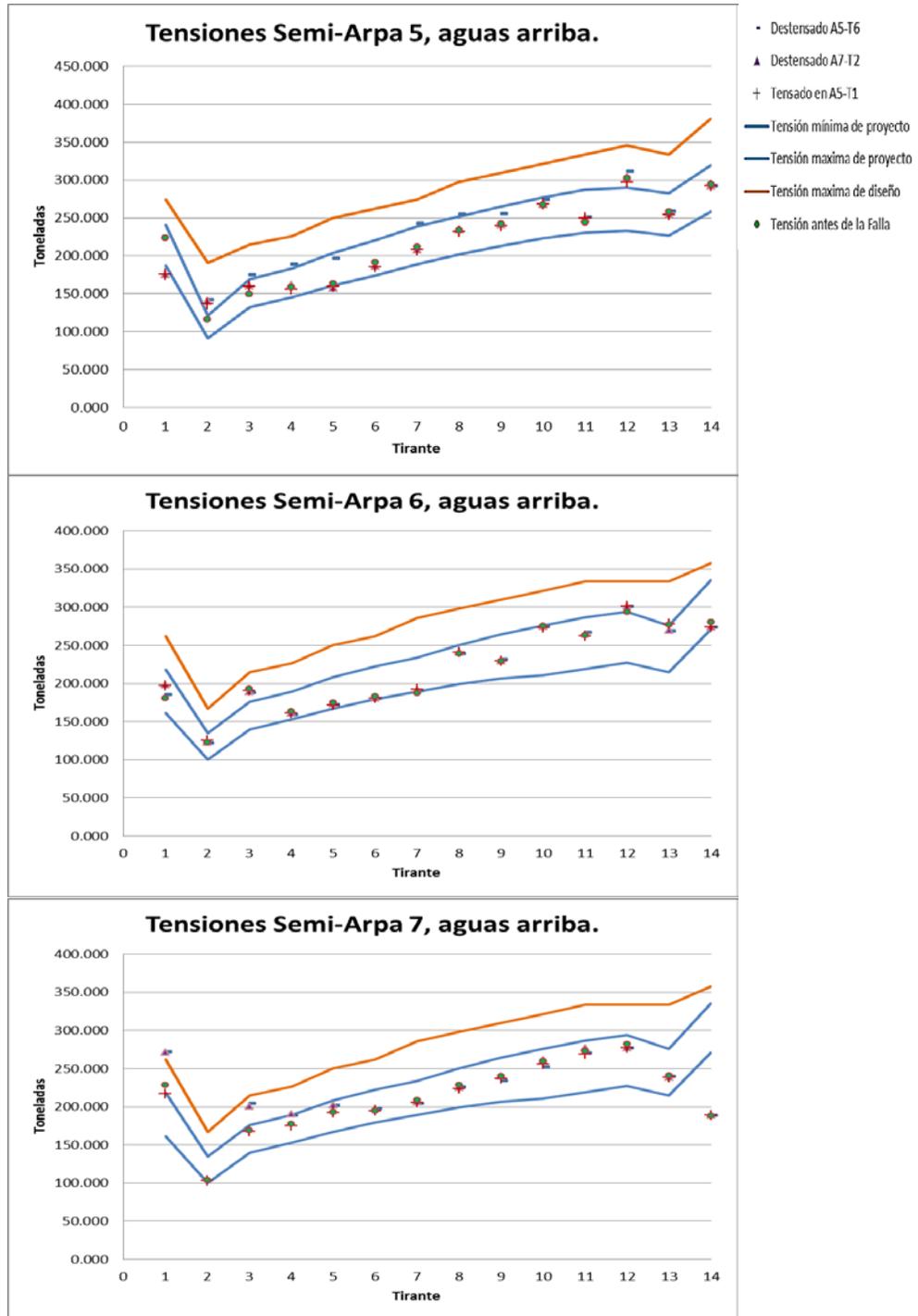


Figura 13. Tensiones de las semi-arpas 5, 6, 7 y 8 durante la rehabilitación.

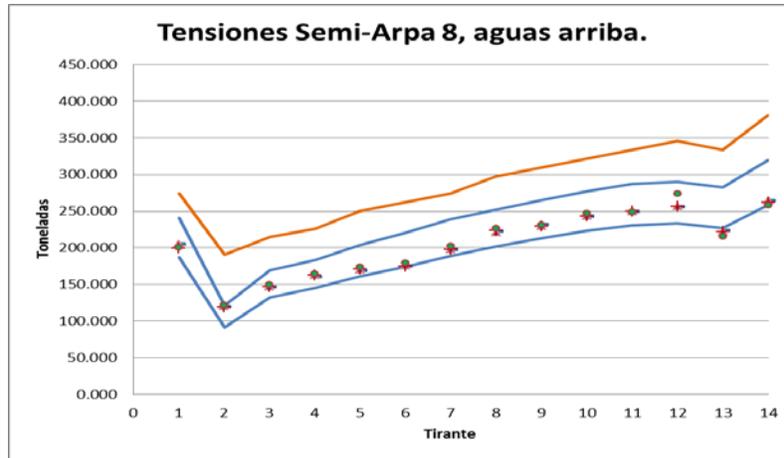


Figura 13 (cont.). Tensiones de las semi-arpas 5, 6, 7 y 8 durante la rehabilitación.

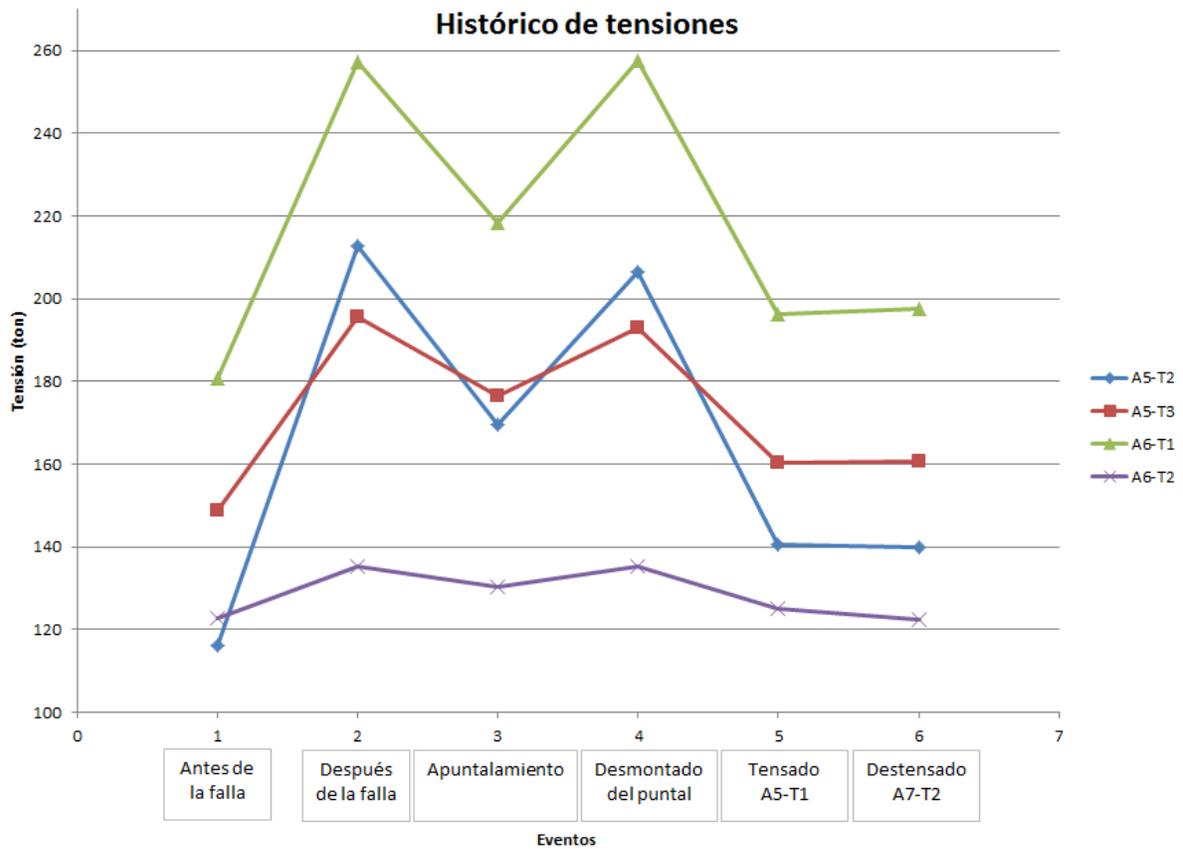


Figura 14. Tensiones de los tirantes contiguos a A5-T1 en los diferentes eventos.

Corroborando los valores de las tensiones a lo largo de los eventos se realizó un resumen histórico de los valores registrados por los sensores de fibra óptica FBG, verificando el aumento promedio de las deformaciones en los sensores ubicados en la zona cercana al tirante que falló. En la figura 14 se aprecia el aumento y decremento de las deformaciones a lo largo de los diferentes eventos ocurridos en el puente, de manera similar como ocurrió con las tensiones registradas.

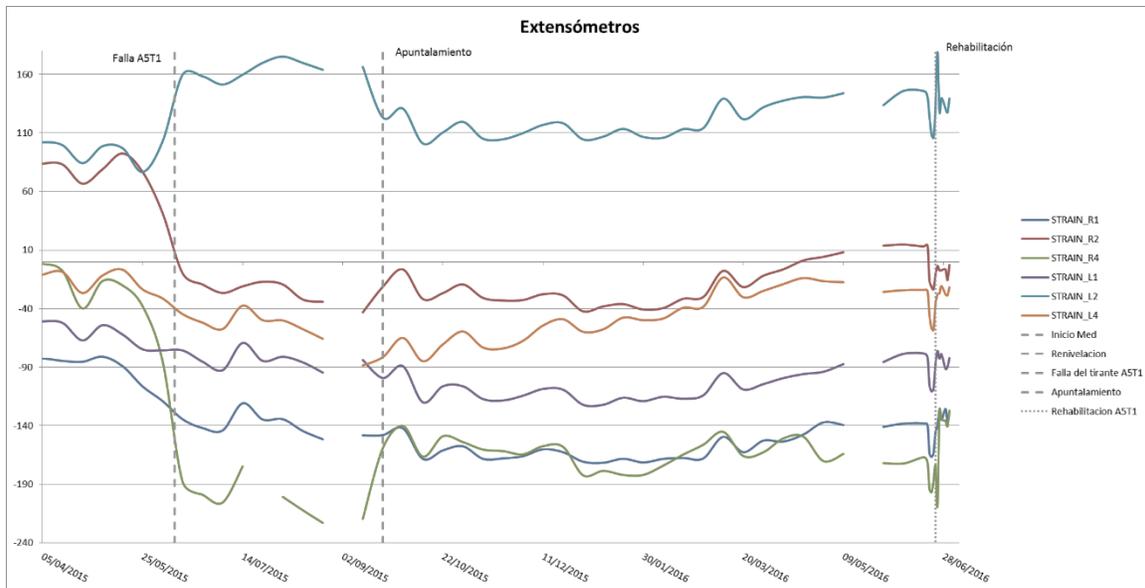


Figura 13. Deformaciones registradas de los extensómetros cerca de A5-T1.

9. Conclusiones.

La instrumentación y los datos obtenidos de ella, se observó que la tensión de los tirantes 2 y 3 de la semi-arpa 5 y 1 y 2 de la semi-arpa 6 aumento súbitamente la tensión durante el desmontado del puntal, en especial en el tirante 2 de la semi-arpa 5 quedando con una carga a 48% de la carga máxima a la ruptura. Sin embargo una vez rehabilitado el tirante en 1 de la semi-arpa 5 las tensiones en los tirantes contiguos disminuyeron alrededor de 90.43% las cargar con respecto a las condiciones previas a la falla. Lo anterior indica que al tirante 1 de la semi-arpa 5 le hace falta aumentar la tensión aproximadamente 9.57% con respecto a la carga después del tensado. Con respecto al destensado del tirante 2 de la semi-arpa 7 las cargas actuales reflejan que el tirante 1 de esta misma semi-arpa la tensión final del procedimiento es de 272 ton que representan 46.6% de la carga máxima a la ruptura, esto significa que al momento de la rehabilitación de este tirante hay que tener especial cuidado para dejar las cargas a un estable previa. Cabe mencionar que después destensado del tirante 6 de la semi-arpa 5 ninguna de las cargas en esta semi-arma aumento arriba del 45% de la carga máxima a la ruptura quedando por debajo del criterio del límite máximo de diseño.

El monitoreo estructural es de suma importancia durante la rehabilitación de cualquier estructura, permitiendo conducir las acciones de restauración a dejar dicha estructura a una condición previa a alguna falla.

Referencias

- [1] Martínez L, Quintana J, Arroyo B, Carrión F y Crespo S, "Análisis de vibraciones en puente atirantado como herramienta de diagnóstico en monitoreo estructural", Memorias del xxi congreso internacional anual de la SOMIM, 2015.
- [2] Quintana J, "Análisis del Método de Búsqueda Global para la Detección de Daño y Monitoreo Estructural de Puentes", DOCTOR EN CIENCIAS, INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL, 2016.
- [3] Instituto Mexicano del Transporte, "ANÁLISIS DE FALLA DEL TIRANTE 1 SEMI ARPA 5 Y EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE LOS ELEMENTOS DE ANCLAJE DEL PUENTE RÍO PAPALOAPAN", Sanfandila, Querétaro, 2015.



- [4] Crespo S, Quintana J, Sepúlveda F, Hernández J y Gasca H, "AE DEFECT EVALUATION OF THE UPPER ANCHORAGE ELEMENTS OF A STAYED BRIDGE", 32nd European Conference on Acoustic Emission Testing 2016, p. 11, 2016.
- [5] Hernández J, Crespo S, Quintana J, Martínez L y Gasca H, "Diseño e implementación de un sistema de instrumentación para el monitoreo estructural del Acueducto de Querétaro", Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015 Desarrollo de software y hardware en mecatrónica., 2015.
- [6] Instituto Mexicano del Transporte, "ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN PUENTE ATIRANTADO EVALUACIÓN DE CABLES", Sanfandila, Querétaro, 2016.
- [7] French A, Vibraciones y ondas. Barcelona: Editorial Reverté, 1974.



Sistema mecatrónico de ajuste automático para fuente de alto voltaje en equipo de electrospinning

Domingo Rangel Miranda^{1*}, Mario Ed Rodríguez Sánchez², Mario Ramos Montes², Miriam Rocío Estévez González¹

1.-Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla Querétaro, Qro., C.P. 76230, México.

2.-Universidad Tecnológica de Querétaro, Av. Pie de la Cuesta 2501, Col. Unidad Nacional, C.P. 76148, Santiago de Querétaro, Qro., México.

*Autor para correspondencia.

E-mail: ranged@fata.unam.mx (D. Rangel).

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño y construcción de un sistema mecatrónico de ajuste automático para fijar el nivel de voltaje deseado en una fuente de alto voltaje (HV) mediante un microcontrolador. Esta fuente de alto voltaje es utilizada por un sistema que genera biofibras mediante la técnica de electrotejido (electrospinning), las cuales requieren de polarizar un biopolímero con alto voltaje de CD (corriente directa). El sistema diseñado y construido consta de un transformador de alto voltaje de 120 VAC de entrada y 20 kV de salida a 5 mA, en el cual una vez que este voltaje es rectificado, filtrado y convertido en alto voltaje de CD, se requiere mantener fijo, ya que es necesario un campo eléctrico estable para generar las biofibras mencionadas. El autoajuste se lleva a cabo por un sistema de control en lazo cerrado que toma una muestra del voltaje de entrada del devanado primario del transformador (HV) y lo compara con el valor deseado en alto voltaje. Un microcontrolador PIC18F4550 procesa esta comparación y corrige el valor de la salida de alto voltaje a través de un actuador, que es un autotransformador rotatorio (VARIAC) colocado a la entrada del transformador de (HV) y cuya salida es proporcional a su ángulo de giro que va de 0 a 333° controlado por un motor a pasos. El sistema propuesto es capaz de autoajustar el nivel del alto voltaje deseado en tiempos de 10 a 20 segundos y con un error de ± 0.75 %. Se presentan curvas de respuesta del nivel de alto voltaje conseguido con este sistema automatizado a diferentes valores deseados de alto voltaje y el análisis de su respuesta.

Palabras clave: Autoajuste, Alto Voltaje, Sistema Mecatrónico, Microcontrolador, Variac.

1. Introducción

Los sistemas de alto voltaje han sido siempre de gran utilidad en la experimentación científica y en aplicaciones tecnológicas. Muchos son los beneficios de utilizar grandes campos electrostáticos para la interacción con la carga eléctrica de los materiales en sus diferentes estados, ya que el campo eléctrico intenso orienta, en ocasiones de manera permanente, los dipolos, segmentos moleculares o pasa los átomos a estados excitados [1]. Ya sea para la ionización de un gas, polarización de un material dieléctrico o la evaluación de la rigidez dieléctrica de un líquido. Sin embargo su utilización con las medidas adecuadas de seguridad para el usuario son imprescindibles, una vez que las intensidades alcanzadas por las fuentes de HV podrían causar severos daños, si no se toman en cuenta los parámetros que influyen en su diseño y su funcionamiento [2]. Es por ello que se han realizado diseños que contemplan la automatización de fuentes de alto voltaje tipo Cockcroft-Walton, basadas en tres etapas multiplicadoras, en las cuales se ha hecho una caracterización completa de



su respuesta y son controladas mediante software programado en microprocesador, dando buena respuesta y estabilidad en el tiempo [3]. Por otro lado se han incrementado los campos de aplicación de los sistemas de alto voltaje, como es en el área de la ingeniería de tejidos biológicos, donde es posible la generación o regeneración de algunos tejidos u órganos, cuya fabricación es basada en técnicas de electrohilado (electrospinning); donde es posible mediante el uso de biopolímeros compatibles con el tejido humano y campos electrostáticos intensos, crear estructuras para crecimiento celular en sustitución de tejido dañado [4]. Así mismo con las técnicas mencionadas es posible modificar la porosidad, morfología, módulos elásticos de los biomateriales, cambiando los parámetros de los campos electrostáticos generados por el alto voltaje y manteniendo gran estabilidad de los mismos [5]. Por lo anterior, en este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema mecatrónico de autoajuste del nivel de alto voltaje, que mantiene el nivel deseado de HV por el usuario, muy estable en el tiempo y es capaz de darle las condiciones experimentales de seguridad para llevar a cabo trabajo experimental en la fabricación de andamios de crecimiento celular por medio de la técnica de electrospinning.

2. Desarrollo

2.1 Generación de Alto Voltaje

Para el diseño del sistema se utilizó el voltaje monofásico de línea que es de 127 VAC. Por otro lado se requería un nivel de alto voltaje máximo de 20 kVDC con un voltaje de rizo < 0.5% como nivel de voltaje necesario para la formación de biofibras nanométricas en un sistema de electrotejido, debido a que la repulsión electrostática contrarresta la tensión superficial del biopolímero para formar una gota y después la biofibra. Por lo que las características del transformador de alto voltaje (HV) fueron obtenidas de la siguiente ecuación:

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P} = \frac{N_P}{N_S} = m = 0.00635 \quad (1)$$

Donde:

V_p = voltaje en el embobinado primario o voltaje de entrada

V_s = voltaje en el embobinado secundario o voltaje de salida

I_p = corriente de la bobina primaria = 833 mA

I_s = corriente en la bobina secundaria = 5 mA

N_p = número de vueltas en el embobinado primario = 60

N_s = número de vueltas en el embobinado secundario = 10,000

m = relación de transformación = 0.00635

Además de un voltaje de rizo que se define como:

$$\Delta V = 0.5(V_{max} - V_{min}) \quad (2)$$

Siendo:

$\Delta V =$ amplitud del voltaje de rizo

$V_{max} - V_{min} =$ diferencia de voltaje de los valores máximo y mínimo del rizo

Además si se sabe que cuando se conecta una carga R_L a la fuente de alto voltaje la salida varía por el valor de rizo [1], y la carga eléctrica o corriente transferida $i_L(t)$ a la misma en un periodo de tiempo $1/T$ de la señal de AC, es representada como:

$$Q = \int_T i_L(t)dt = \frac{1}{R_L} \int_T V(t)dt = IT = \frac{I}{f} \quad (3)$$

Siendo:

$I =$ valor medio de la salida de la corriente $i_L(t)$ en DC

$V(t) =$ voltaje en DC que incluye el voltaje de rizo

Por lo que el voltaje de rizo en un ciclo de conducción de la corriente alterna y despreciando la resistencia de los diodos de HV, entonces el valor de rizo será de:

$$Q = 2\Delta VC = IT \quad \rightarrow \quad \Delta V = \frac{IT}{2C} = \frac{I}{2fc} \quad (4)$$

Si tenemos una corriente de $500 \mu A$ que requiere el biopolímero para polarizarse y tenemos 7 capacitores el paralelo de 2.7 nF cada uno, teniendo una frecuencia de 120 Hz , tenemos:

$$\Delta V = \frac{0.5 \text{ mA}}{2 * 120 * 18.9 \text{ nF}} = 110 \text{ V} \quad (5)$$

Por lo tanto tenemos un voltaje de rizo de 0.55% en la salida de HV a plena escala y a esa corriente de carga.

En la figura 1 se muestra el transformador de alto voltaje encapsulado en un compartimiento metálico y los bornes de salida con aisladores de cerámica. Además se observa la sección de rectificación con un conjunto de 8 diodos (NTE ELECTRONICS NTE517 Standard Power Diode, Single, 15 kV , 550 mA , 610 mV), cuyo arreglo en serie de 4 diodos por ciclo de conducción nos da un pico inverso sobre los cuatros diodos de 60 kV y filtraje dado por 7 capacitores de que dan un total de 18.9 nF embebidos todos en una resina epóxica sólida y transparente que da protección al usuario y aislamiento eléctrico al sistema.

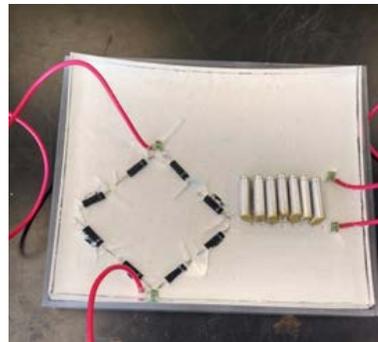


Figura 1. Transformador de alto voltaje, izquierda; y etapa de rectificado y suavizado DC, derecha.

La relación entrada-salida del transformador de alto voltaje junto con su curva de ajuste se muestran en la figura 2, donde se observa una pequeña no linealidad atribuible a las pérdidas magnéticas del núcleo laminado de acero del transformador y el cual se tomó en cuenta en el momento de obtener el error máximo del nivel de HV, en un intervalo 0 a 127 V de entrada y de 0 a 16,500 VAC a la salida.

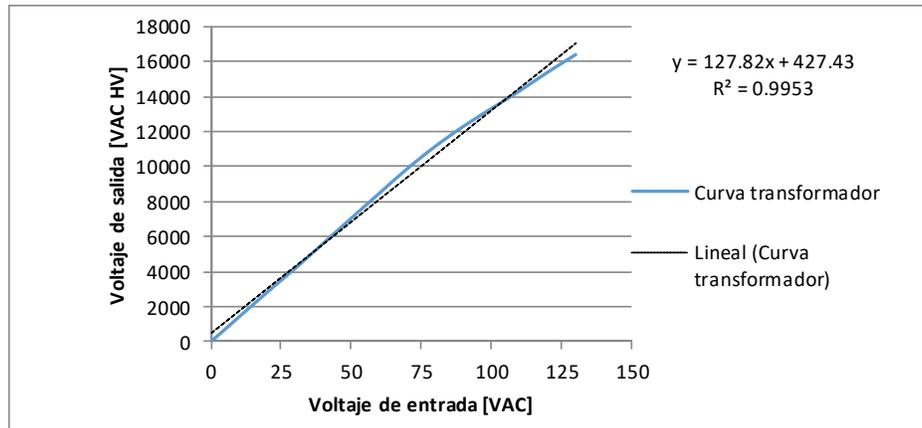


Figura 2. Relación de entrada-salida del transformador de alto voltaje.

2.2 Acoplamiento mecánico del autoajuste.

Una vez que fueron caracterizados los elementos de generación de alto voltaje se procedió a controlar la entrada del transformador HV, seleccionando un autotransformador VARIAC modelo Type 10C PowerStat, 120 VAC de entrada y dos salidas: 120 VAC ó 132 VAC como transformador elevador ambos a 2.25 A y con un torque necesario para rotar la perilla de control de 0.36 kg-cm, que va de 0 a 336° ya sea en sentido horario (CW) o en sentido antihorario (CCW), a frecuencias de trabajo desde 50 a 2000 Hz.

En la figura 3, se observa el autotransformador VARIAC, el cual fue acoplado a un motor a pasos mediante un sistema de engranes de plástico de 42.17 mm y 32.71 mm de diámetro, 45 y 34 dientes respectivamente. En la figura 3 se observa este acoplamiento el cual permitió la transmisión de torque adecuadamente.



Figura 3. Acoplamiento mecánico del cursor del VARIAC con el motor a pasos.

El motor a pasos modelo SM 42BYG011-25 es conectado en modo bipolar a un voltaje de 12 VDC, con una corriente de 0.33 A. Tiene un torque de 2.3 kg-cm y el conjunto VARIAC motor está alojado en un encapsulado de plástico PLA, construido en una impresora 3D.

2.3 Diagrama a bloques del sistema.

Este sistema de ajuste automático consta de una toma del voltaje de línea que es de 127 VAC, el cual alimenta a dos fuentes para obtener 5 y 12 VDC, una que polariza el sistema digital y la otra energiza al motor a pasos. Un microcontrolador PIC se encarga de mostrar la salida del VARIAC mediante un mini transformador, que reduce el voltaje muestreado a valores entre 0 y 5 VAC el cual es convertido a su vez en VDC para introducirlo al μC . La señal de actuación es enviada a un driver A4988 que maneja la corriente necesaria para mover el motor a pasos, como se aprecia en la figura 4.

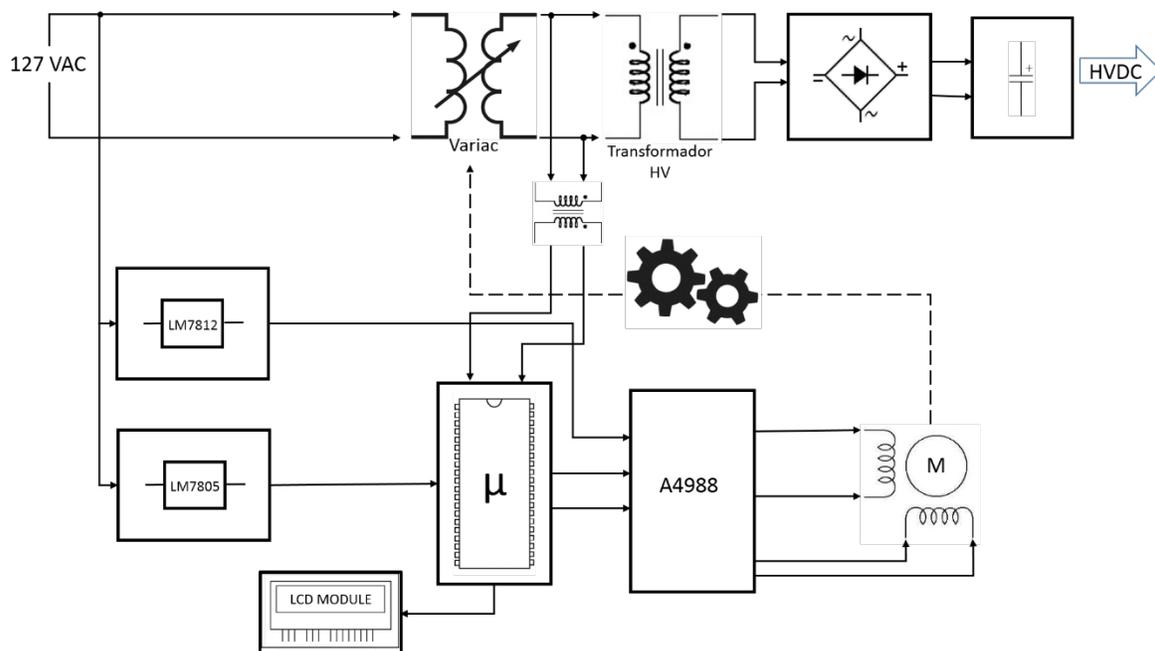


Figura 4. Diagrama a bloques del sistema y acoplamiento mecánico.

Un display alfanumérico de 16x2 segmentos nos muestra la lectura del HV actual y el valor deseado por el usuario, quien lo introduce de forma analógica con un potenciómetro al microcontrolador. El voltaje que puede tomar el potenciómetro va de 0 a 5 VDC que equivale a 153.67 VAC a la entrada del transformador HV y 27 kV máximo a su salida. En el caso del sistema de electrotejido se restringió el valor de la salida de alto voltaje a 20 KV que equivale al 73% de la máxima salida que puede generar el sistema.

2.4 Sistema de control en lazo cerrado.

El lazo de control lo forman la planta, que es el transformador de alto voltaje cuya relación de entrada-salida fue mostrada anteriormente y tiene un comportamiento lineal, con un error de linealidad menor al 1%; ello permite que la posición del VARIAC que controla el voltaje de entrada del transformador HV, pueda ser manejada por un motor a pasos, ya que con la resolución de 1.8° por paso y la relación de engranes de 0.8 podemos alcanzar resolución angular de 1.36° en el VARIAC, permitiendo mejor aproximación. Un microcontrolador PIC18F4550 se encarga de estar

monitoreando, a través del VARIAC, el voltaje de entrada del transformador de alto voltaje para corregir cuando haya cambiado por alguna circunstancia el voltaje de la línea de 127 VAC, tal como se muestra en la figura 5.

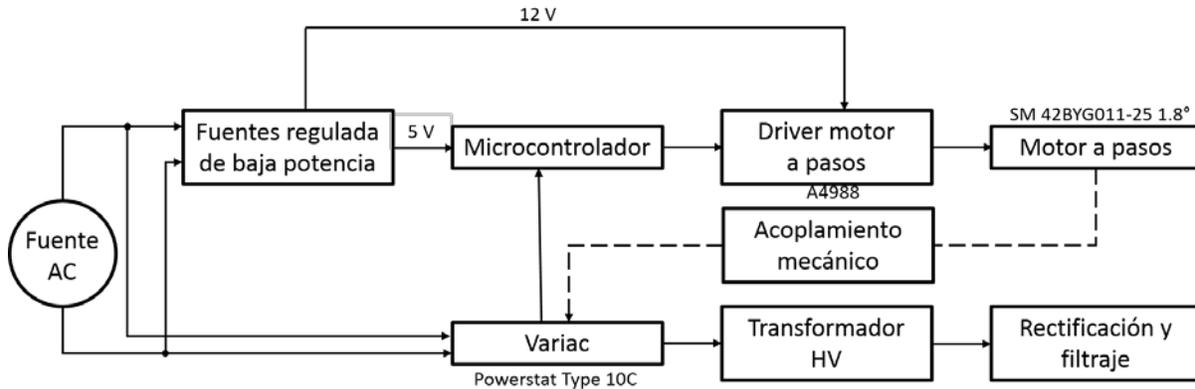


Figura 5. Control en lazo cerrado del ajuste automático de nivel de alto voltaje.

El torque de mantenimiento del motor a pasos es suficiente para anclar la posición del rotor del VARIAC cuando éste alcanzó el nivel deseado; una vez que los pasos son calculados y enviados para ser recorridos angularmente por el VARIAC, los realiza, ajusta el nivel en tiempos de alrededor de 15 s y permanece estable.

2.5 Algoritmo de control.

Para llevar a cabo la tarea de ajustar automáticamente se programó la rutina de control con tiempos adecuados de conversión AD de la señal de monitoreo y dando los retardos de tiempo a las señales digitales de control de movimiento angular a través del driver A4988, que permite cambiar el sentido de giro del motor a pasos en milisegundos y ajustar el nivel de alto voltaje.

Al iniciar, con una rutina de auto-zero, el sistema automáticamente se ajusta para dar una tensión aproximada de 0 volts, por seguridad hacia el usuario. A partir de este momento, el usuario puede indicarle al sistema cuál es el valor que se desea obtener a la salida. Una vez ingresado en el sistema el valor deseado, éste se convierte a los puntos de conversión ADC del microcontrolador. La salida del VARIAC pasa por un transformador que baja la tensión y de ahí a un divisor de tensión. Esta división de tensión se tomó en cuenta para que el máximo número de puntos ADC(1024) sea correspondiente a la salida máxima que puede tener el VARIAC, tomando en cuenta el valor máximo de voltaje del suministro de electricidad por la CFE en México.

La figura 6 muestra el diagrama de flujo de la rutina de control de ajuste de nivel de alto voltaje.

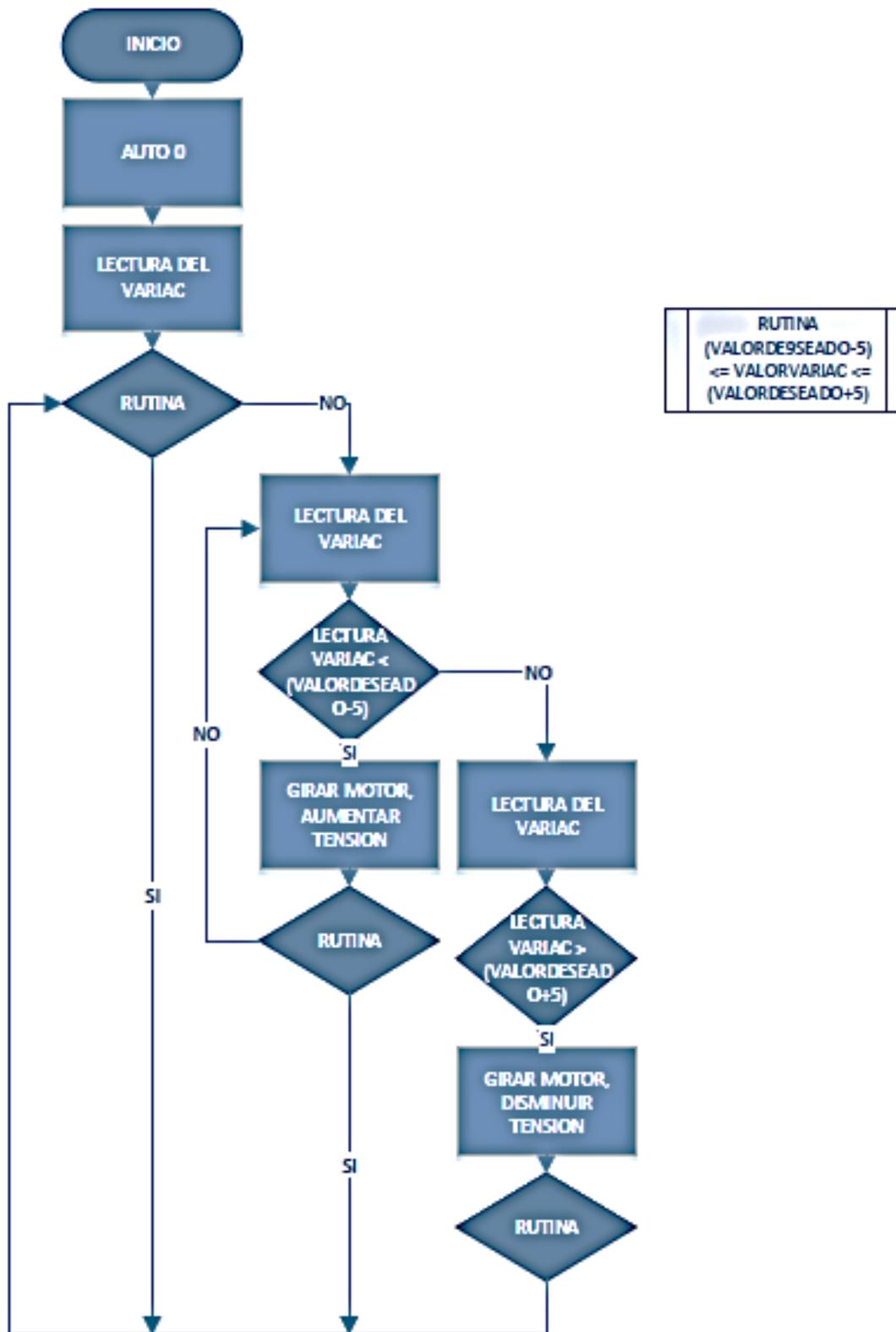


Figura 6. Diagrama de flujo de la rutina de control de nivel de alto voltaje.



Primero, se registra el valor leído deseado en puntos ADC y se compara con el valor actual real en puntos ADC leídos a la salida del VARIAC. Si el valor real en puntos ADC es menor que el deseado, se hace girar el motor a pasos acoplado mecánicamente a la perilla del VARIAC para aumentar la tensión y así acercarnos al valor deseado. El programa se detiene si el valor real (en puntos ADC) tuviera un rango de 5 puntos ADC mayor o menor al deseado. Esto porque al mover un paso el VARIAC, puede tener cambios de entre 3 a 4 puntos ADC, lo cual le permite que quede en una posición estable y no esté variando y cambiando constantemente la tensión. Del mismo modo funciona si la tensión real es mayor a la deseada. Si se da este caso, el motor a pasos daría un giro en sentido inverso para disminuir la tensión. Constantemente cada segundo, se lee el valor deseado y el valor real y se comparan.

3. Resultados

Se llevaron a cabo varias pruebas de alto voltaje programado a diferentes niveles requeridos por el usuario, primero se programó un voltaje requerido de 8300 volts de DC. La figura 7 muestra el voltaje alcanzado de 8218 volts en un tiempo de 12 segundos con un error de 82 volts a la salida de HV.

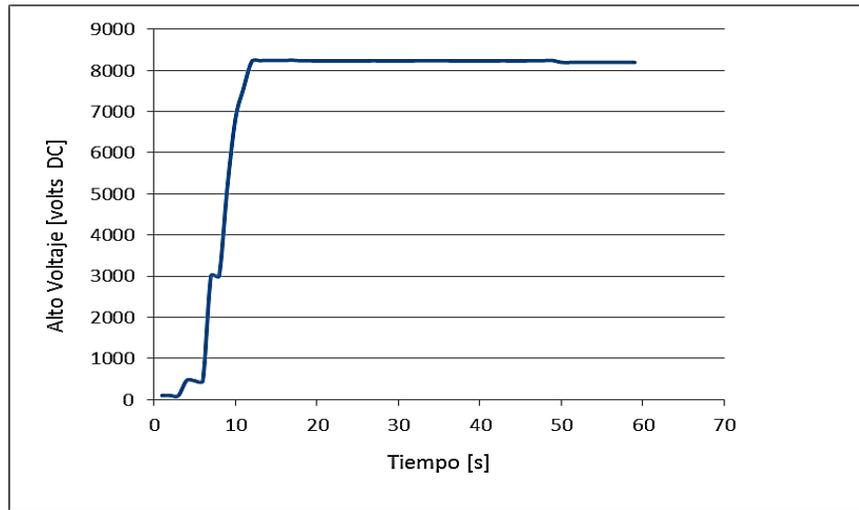


Figura 7. Respuesta del sistema a un voltaje programado de 8300 VDC (HV).

Se observan varias oscilaciones al inicio para alcanzar el voltaje requerido debido al algoritmo de ajuste, así mismo se programó el sistema para tener incrementos aproximados de 1000V HV/segundo, evitando con esto el incremento súbito de voltaje en la bobina del transformador. Después se programó un voltaje de usuario de 12500 VDC, y en la figura 8 se muestra la respuesta dada por el sistema, donde la salida en promedio en régimen permanente fue de 12546 VDC con un error menor de $\pm 0.75\%$ a plena escala, con un pequeño retardo inicial de 4 segundos, pero una vez alcanzado el valor deseado, permanece muy estable la salida, que es el requerimiento principal. Este voltaje fue alcanzado en 12 segundos.

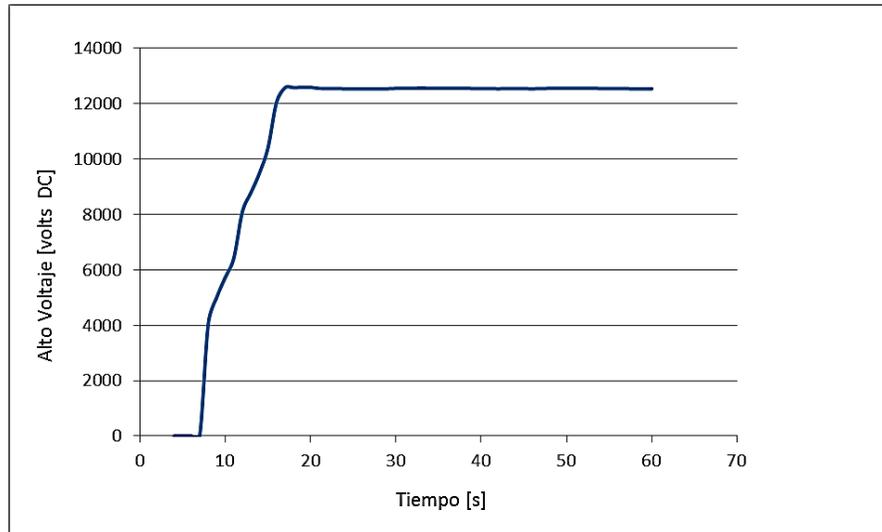


Figura 8. Voltaje programado de 12500 VDC (HV) y la respuesta del sistema.

También fue programada una salida de 17500 VDC y la salida fue estabilizada en un voltaje promedio de 17640 que tiene el 0.7% de error, el cual es aceptable si consideramos que el usuario pide una tolerancia menor al 1%, como se aprecia en la figura 9. Desde luego si consideramos los tiempos que se requieren para que se establezca la salida deben ser los más rápidos posibles. Pero si incrementamos la velocidad es posible que puedan perderse algunos pasos en el ajuste, ya que el motor a pasos tiene una frecuencia angular máxima de giro, lo que incidiría directamente en la precisión del nivel de alto voltaje a la salida.

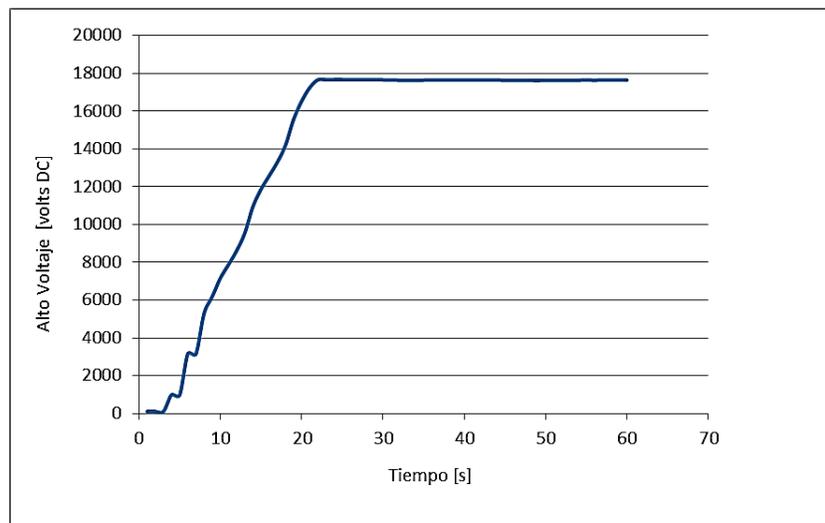


Figura 9. Alto voltaje programado a 17500 VDC controlado con el autoajuste.

En la figura anterior se aprecia que una vez se inicia el proceso de autoajuste, el algoritmo compara el estado inicial de la salida y empieza a realizar comparaciones con el valor deseado, se puede ver que al inicio hay algunas fluctuaciones debidas a las comparaciones en el programa, pues en valores bajos de salida los niveles se asemejan al error permitido, pero una vez que considera que está alejado del valor inicial de cero, el sistema incrementa casi linealmente para alcanzar el valor programado. Esta salida en régimen permanente permanece muy estable cuando alcanza el



nivel requerido y por lo tanto cumple con la necesidad de mantener sin variación la salida, para tener un campo eléctrico estático estable.

4. Conclusiones

Se logró implementar un sistema de ajuste automático de nivel de alto voltaje mediante el acoplamiento de un autotransformador con variación mecánica rotatoria de salida, la cual se controló electrónicamente. La ventaja de utilizar este autotransformador fue que la salida en HV solo es controlada variando la amplitud de la entrada del transformador de HV sin afectar la forma de la señal sinusoidal pues de otra manera pudieran generarse picos intempestivos de voltaje por el cambio abrupto de la corriente en el embobinado primario, por ejemplo si se recortara la señal sinusoidal por la técnica de ángulo de disparo para cambiar el valor eficaz de la señal. Así mismo, un algoritmo de control fue diseñado e implementado en un microcontrolador de gama media con el que se logra realizar la conversión análogo-digital de la señal de referencia y utilizar los pasos de conversión para adecuar la salida a plena escala de HV a 1024 posibles estados, logrando con ello mejor exactitud en el nivel del alto voltaje. La posición del cursor del autotransformador fue ajustada con una exactitud de $\pm 0.75\%$ que equivale a ± 150 VCD en la salida de alto voltaje a plena escala. La rapidez en la conversión análogo-digital del nivel de referencia de alto voltaje por medio del microcontrolador con un reloj de 4 Mhz, permite lograr un autoajuste en tiempos mínimos de 20 s. Se logró mantener estable la magnitud del campo eléctrico de alta intensidad que polariza el biopolímero una vez que éste fue autoajustado, pudiendo con ello obtener biofibras de buena calidad en un equipo de electrospinning.

Referencias

- [1] Kuffel E., Zaengl W., Kuffel J. "High Voltage Engineering Fundamentals", Butterworth-Heinemann Reed Educational and Professional Publishing Ltd, Oxford OX2 8DP, 225 Wildwood Avenue, Woburn, MA 01801-2041, USA, Second edition, 2000.
- [2] Martinez J., Magnusson J., Velasco, A. "Parametric analysis of the hybrid HVDC circuit breaker", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 84, 284-295, 2017.
- [3] Alampratap S., Singh T., Reddy C. "Design and Development of Microcontroller Driven, Portable, Low-Cost HVDC Source", IEEE International Conference on Signal Processing, Computing and Control, ISPPC 2013, Article number 6663468, Shimla HP India, 2013.
- [4] Wan L., Cato T., Edward J., Rocky S., Frank K. "Electrospun nanofibrous structure: a novel scaffold for tissue engineering", Journal of Biomedical Materials Research, 60 (4), 613-621, 2002.
- [5] Boudriot U., Dersch R., Greiner A., Wendorff J. "Electrospinning approaches toward scaffold engineering: a brief overview", Artificial Organs, 10, 785-792, 2006.



Control Proporcional Integral con Anti WindUp en Motor de DC

Cortés Ramírez Ulises, Castañeda Espinoza Angélica.

Universidad Tecnológica de Huejotzingo
Laboratorio de Mecatrónica
Santa Ana Xalmimilulco s/n, Huejotzingo, Puebla
ulises@cortes.mitmx.net

Resumen

En este artículo se presenta el control de velocidad de un motor de DC, la estrategia utilizada es un controlador Proporcional Integral (PI) con Anti WindUp, con el objetivo de reducir el desgaste físico por calentamiento en el motor causado por sobretiros y saturación en el actuador. Empleando una interfaz de usuario se obtendrá su respuesta en lazo abierto, posteriormente se caracterizará y modelará por métodos computacionales para así hallar su función de transferencia; para validar este resultado se realizará una comparativa de la respuesta en lazo abierto ante el control PI, y PI con Anti WindUp, y para determinar con certeza de que en efecto se reduce el desgaste en la planta, se obtendrá la respuesta de torque del motor de DC a partir del sensado de corriente; al implementar la integración con anti Windup se verán disminuidas significativamente las oscilaciones, y por lo tanto se reducirá el calentamiento en la planta debido a los cambios bruscos en el consumo de corriente.

Palabras clave: Control PI, Anti WindUp, Modelado de Sistemas, Control de Velocidad.

1. Introducción

El control Proporcional Integral Derivativo (PID) es una estrategia de control sumamente utilizada por su facilidad de implementación y gran desempeño, recientemente ha tenido cambios significativos en su arquitectura clásica, con modificaciones como el anti WindUp en la acción integral [1].

Para este caso en particular la velocidad del Motor de DC tiene un valor máximo delimitado por el voltaje de alimentación además de sus características físicas, donde el valor máximo de velocidad estará dado por el valor máximo de la fuente de alimentación, para la salida de control $u(t)$ cuando toma valores por arriba de los niveles máximos, podemos argumentar que el actuador entrará en saturación o más bien cae en un WindUp, esto causado por la acción integral ante cambios bruscos en la señal de error $e(t)$, la acción Anti Windup tiene la finalidad de evitar que el actuador permanezca fuera de sus límites de saturación, al resetear la integral y recalcular este término.

Una parte altamente esencial al implementar una estrategia de control, es la de conocer el modelo matemático de la planta, en este caso en específico para el motor de DC se emplearán métodos computacionales para obtener su función de transferencia a partir de su respuesta en lazo abierto, así como el cálculo de las constantes del control PI.

El control de velocidad de un motor de DC puede tener aplicaciones en el movimiento de articulaciones de robots, como es el caso de los robots móviles con ruedas, donde su locomoción está fijada por el movimiento de un motor de DC para asegurar que la velocidad sea lo más próxima a la deseada, dando como resultado movimientos precisos ante imperfecciones en el suelo, o si sube



o baja una pendiente [2]. Para este trabajo se implementará el control PI en su forma clásica, y PI con saturación y Anti WindUp, con la finalidad de comparar la respuesta y efectividad de cada una de las estrategias de control, se observará la salida del control $u(t)$, y la respuesta de torque para determinar cuál es la estrategia más conveniente para la planta.

2. Modelo Matemático del Motor de DC

2.1 Modelo Teórico del motor de DC

Para encontrar la función de transferencia que caracteriza al motor de DC se empleará la herramienta System Identification de MATLAB, pero de manera previa es indispensable conocer el sistema de ecuaciones que lo representa. El modelo teórico del motor de DC es un tema altamente documentado en literatura, en este trabajo nos basaremos en el planteamiento de [3]; de la Figura 16, es posible indicar que los parámetros que caracterizan el motor de DC se tiene la resistencia de armadura definida como R [Ω], la inductancia de la armadura representada como L [H], el torque representado por τ [Nm], y la carga inercial expresada como J [Kg m^2].

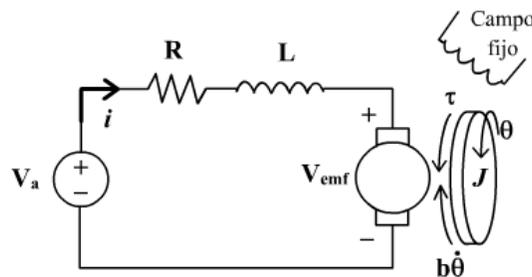


Figura 16. Esquema del motor de DC.

Como primera instancia se contempla el parámetro que corresponde a la constante de torque del motor como:

$$\tau = K_t i \quad (1)$$

donde se determina que el torque τ es proporcional a la corriente de armadura i por la constante de torque del motor K_t .

La fuerza contra electromotriz V_{emf} es proporcional a la velocidad angular multiplicada por la constante eléctrica del motor, expresada como:

$$V_{emf} = K_e \dot{\theta} \quad (2)$$

sí se plantea que la constante de torque y la constante de fuerza contra electromotriz son iguales, entonces es posible expresarlas como k , representando así ambas constantes.

Para hallar las ecuaciones diferenciales que describen la parte mecánica del motor de DC, se puede emplear las leyes de Newton, planteando que la carga inercial J por la primera derivada de la velocidad angular es igual a la suma de los torques del motor.

$$J\ddot{\theta} = -b\dot{\theta} + K i \quad (3)$$



donde: b es la aproximación lineal de la fricción viscosa.

Para la parte eléctrica se puede encontrar su ecuación diferencial a partir de la ley de voltajes de Kirchhoff, expresándola como:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = V_a - K\dot{\theta} \quad (4)$$

aplicando la transformada de Laplace de las ecuaciones diferenciales (3) y (4), se tiene:

$$s(Js + b)\theta(s) = KI(s) \quad (5)$$

$$(Ls + R)I(s) = V(s) - Ks\theta(s) \quad (6)$$

y a partir de (5) y (6), es posible expresar la función de transferencia en lazo abierto del motor de DC como:

$$G(s) = \frac{\dot{\theta}(s)}{V(s)} = \frac{K}{(Js + b)(Ls + R) + K^2} \quad \left[\frac{\text{rad/seg}}{V} \right] \quad (7)$$

donde la salida del sistema es la velocidad angular medida en radianes sobre segundo y la entrada es el voltaje de la armadura expresado en Volts.

2.2 Estimación de la función de transferencia del motor de DC

La ecuación (7) representa la respuesta del motor de DC en lazo abierto, donde la entrada es el voltaje aplicado en la armadura y la salida es la velocidad angular; esta ecuación es ideal para casos en los que se dispone de todos los parámetros del motor, para cuando no se tiene esos datos pueden calcularse a través de métodos como Series Walsh [4], donde se emplean series ortogonales como la matriz de integración producto y de coeficientes. Para este caso se empleará un método más simplificado utilizando la herramienta *System Identification* de MATLAB, donde a partir de la respuesta en lazo abierto se estimará la función de transferencia.

De la ecuación (7), se contempló que la salida del sistema es la velocidad angular y la entrada es el voltaje aplicado en la armadura del motor de DC, para regular el voltaje de alimentación se emplea un puente H con el que se podrá controlar el giro, y la velocidad angular será proporcional al ciclo de trabajo de una señal PWM, la salida de la planta se medirá con un encóder en cuadratura, el cual tiene una resolución de 8400 pulsos por revolución y la posición puede calcularse a partir de:

$$\theta = \frac{2\pi}{C_e \cdot P_e} \cdot CNT[\text{rad}] \quad (8)$$

donde: C_e indica la relación de la caja de engranes, P_e son los pulsos por revolución y CNT es el contador del encóder [5]. Para el caso de la velocidad angular se puede obtener de la primera derivada definida como:

$$w(t) = \frac{\theta(t) - \theta(t - 1)}{\Delta t_m} \quad (9)$$

método planteado en [5], para calcular por odometría la posición y velocidad de un robot móvil con ruedas.



En la Figura 17 se muestra el diagrama a bloques para obtener la respuesta en lazo abierto de la planta, para este caso la entrada será el escalón unitario, indicado con una referencia positiva y negativa en un lapso de 3 segundos, el periodo de muestreo es de 1mseg, la referencia o valor deseado $Wd(t)$ será indicado a la entrada del módulo de potencia en radianes por segundo y serán convertidos a su equivalente en porcentaje del ciclo de trabajo de la señal PWM, del encóder en cuadratura se medirá la posición para después derivarla y así obtener la velocidad angular del motor.

Para el caso del tipo de control que se reporta en este trabajo, una forma de validar si tiene un funcionamiento óptimo para el motor de DC, es a través de la respuesta de la variable de torque, definida en la ecuación (1), la cual está en función de la corriente, esta variable es obtenida a partir de un sensor de corriente (ACS712-05) de efecto hall, con un rango de medida de ± 5 Amperes, este sensor tiene una velocidad de respuesta de $5\mu s$, dispone de un filtro pasabandas y un ancho de banda de 8KHz; además de ser lineal su salida es una señal de voltaje proporcional a la corriente que pasa por el sensor, la cual puede calcularse a partir de:

$$i = \frac{V_o - 1.65}{0.132} \quad (10)$$

donde, V_o es el valor de voltaje a la salida del sensor de corriente.

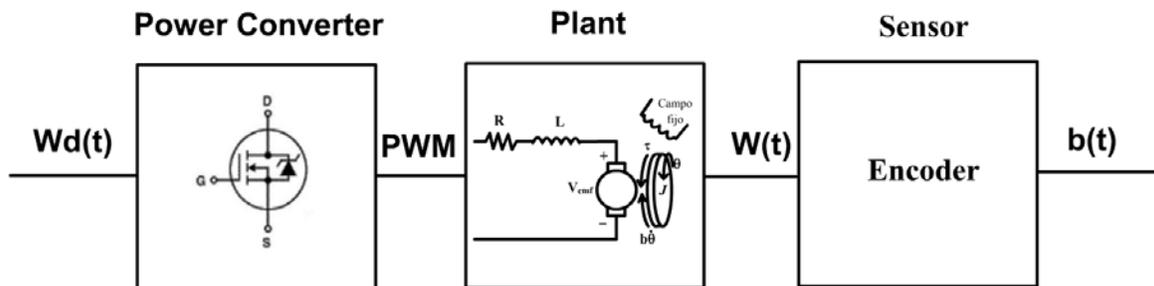


Figura 17. Diagrama a bloque para obtener la respuesta en lazo abierto de motor de DC.

En la Figura 18 (A), se muestra la respuesta obtenida del motor de DC, donde como valor deseado Wd se indicó: del tiempo 0 a 1.5 segundos una velocidad angular de 3.7, y de 1.5 a 3 segundos -3.7 radianes por segundo; en el grafico puede observarse que el valor de velocidad angular W rebasa las referencias indicadas y a simple vista es posible denotar que la respuesta tiene la forma de s y corresponde a un sistema de segundo orden [6]. La señal de la Figura 18 (B), corresponde a la señal del controlador y para el caso de la respuesta en lazo abierto el valor deseado es igual a la variable de control ($uW=Wd$). La Figura 18 (C) corresponde a la señal de error, para la que cuando se implemente la estrategia de control, esta señal tiene que aproximarse a cero; y en la Figura 18 (D) se tiene la respuesta de torque del motor de DC, medido en Newton-metro.

De la señal de torque (Figura 3 (D)), es posible observar que el sobre pico corresponde al par de inercia que rompe el motor de DC en el arranque y este pico se hace más grande cuando pasa de una referencia positiva a una negativa, que tácitamente duplica su valor de cuando está en reposo al arranque; estos picos son los que generan el desgaste del motor de DC y son disipados en forma de calor, además del desgaste ocasionado en la caja de engranes; para cuando la señal de control rebasa los límites máximos y mínimos del actuador, y permanece en saturación estos sobre picos pueden llegar a tener oscilaciones generando aún más el desgaste en la planta.

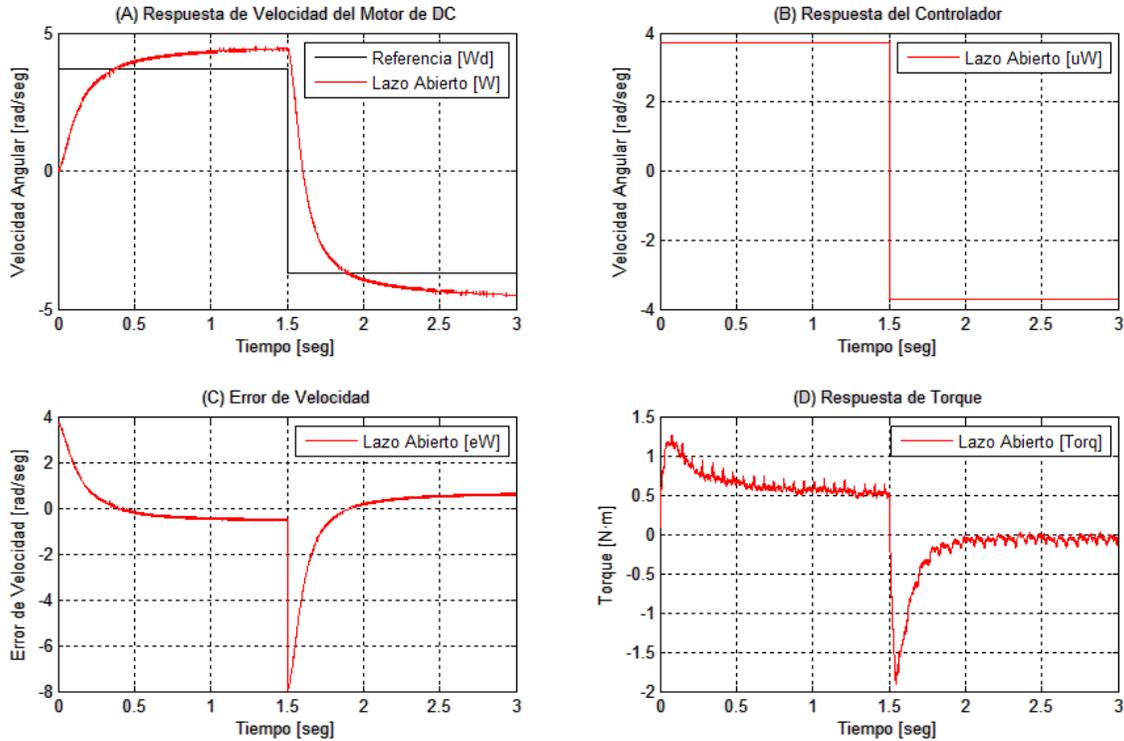


Figura 18. Respuesta en lazo abierto del motor de DC.

Para estimar la función de transferencia con la herramienta *System Identification* de MATLAB mostrada en la Figura 19, se debe introducir los datos de entrada y salida del sistema en el dominio del tiempo, en la opción *import data* elegir *Time domain data*, además del tiempo inicial y el periodo de muestreo.

Después de importar los datos y estimar la función de transferencia, en la caja de selección *Model Output* es posible ver la respuesta del sistema, mostrada en la Figura 20, donde el trazo de color negro representa la señal de entrada y el trazo azul al modelo estimado, el cual esta ponderado con una aproximación del 97.24%.

El modelo de salida estimado está representado por:

$$G(s) = \frac{737.9}{s^2 + 89.49s + 650.5} \left[\frac{\text{rad/seg}}{V} \right] \tag{11}$$

que corresponde a la aproximación de la función de transferencia del motor de DC, la cual es la relación de la entrada con respecto a la salida.

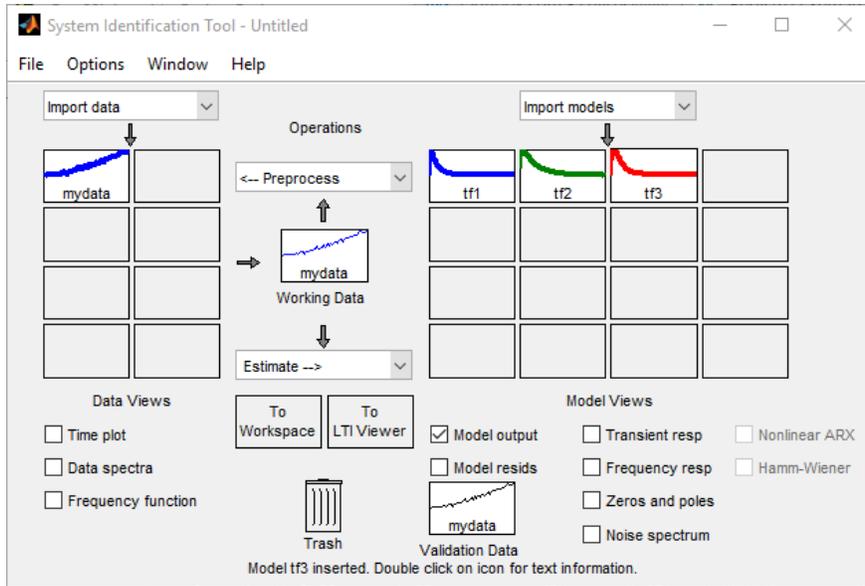


Figura 19. Datos para la estimación de la función de transferencia.

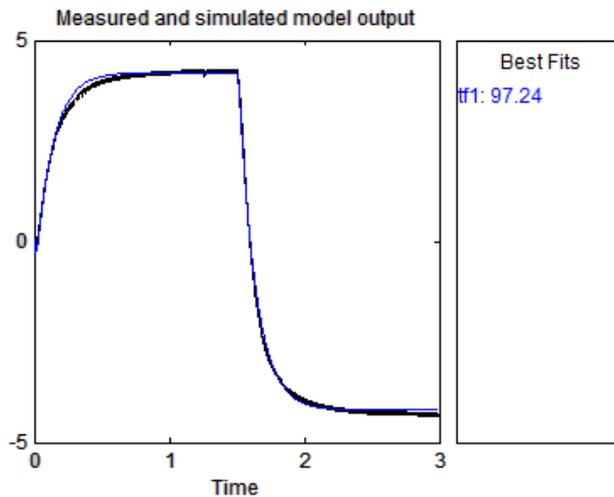


Figura 20. Respuesta de la señal de entrada y el modelo estimado.

3. Estrategia de Control

3.1 Esquema de control PID

El control PID está conformado por tres acciones de control, que son: Proporcional, Integral y Derivativo. Esta estrategia de control puede expresarse en su forma paralelo (12) o en su forma estándar (13), estas difieren en que para el primer caso se calculan las K 's (ganancias de las acciones de control) y para el segundo caso se calculan los tiempos de integración y derivativo, así como una constante proporcional.

$$G_c(s) = K_p E(s) + K_i \frac{E(s)}{s} + K_d s E(s) \tag{12}$$



$$G_c(s) = K_p \left(E(s) + \frac{E(s)}{T_i s} + T_d s E(s) \right) \quad (13)$$

3.2 Esquema de control Proporcional Integral

Después de obtener la respuesta de la planta en lazo abierto, se implementará la estrategia de control Proporcional Integral, en la Figura 21 se muestra un diagrama a bloques de este controlador en su forma paralelo, donde solo se tienen implementadas las acciones proporcional e integral, y la acción de control derivativa es omitida, esto debido a que la planta es un motor de DC y se pretende evitar el ruido producido por la derivada del error; y posteriormente se obtendrá la respuesta del control $u(t)$, el error $e(t)$, la velocidad angular $W(t)$ y el torque; para observar el desempeño del controlador se realizarán tres pruebas con diferentes valores de K_p y K_i , los que se estimaran con la herramienta PID tuning de Matlab.

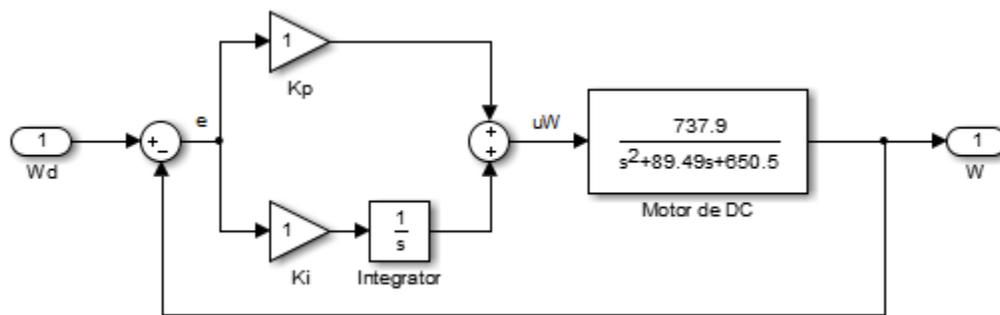


Figura 21. Modelo de control Proporcional + Integral.

3.3 Control PI con saturación y Anti Windup

En la Figura 22 se ha implementado en el modelo de control los bloques de saturación y anti WindUp [7], donde se puede observar que esta acción está conformada por la diferencia de la salida de control menos la salida del saturador, resultado que será multiplicado por una constante de tiempo T_t denominada como tiempo de seguimiento y es sumada al error multiplicado por la constante integral (K_i), de lo que, cuando el actuador rebasa los límites máximo y mínimo de saturación la acción anti WindUp se encarga de recalcular la acción integral [8], pero si, la salida de control $u(t)$ permanece dentro de los límites de saturación, la acción Anti WindUp no tendrá efecto alguno en la acción integral, básicamente el WindUp, solo está presente durante el transitorio y cuando la referencia de control tiene un cambio brusco, como es el caso del arranque o cuando pasa de un valor positivo a negativo o viceversa.

El término T_t representa el tiempo de seguimiento y es la razón en la que la acción integral es reseteada, esta constante de tiempo se recomienda sea mayor al tiempo derivativo y menor al tiempo integral [7], para esta implementación la entrada del integrador estará dada como:

$$\frac{1}{T_t} e_s + K_i e \quad (14)$$

donde e_s es el error de saturación y está dado como la diferencia de $u - v$, y en estado estacionario está representado como:

$$e_s = -K_i T_t e \quad (15)$$



por lo que la entrada de saturación puede expresarse como:

$$v = u_{lim} + K_i T_t e \quad (16)$$

donde u_{lim} es el valor de saturación de la salida del controlador.

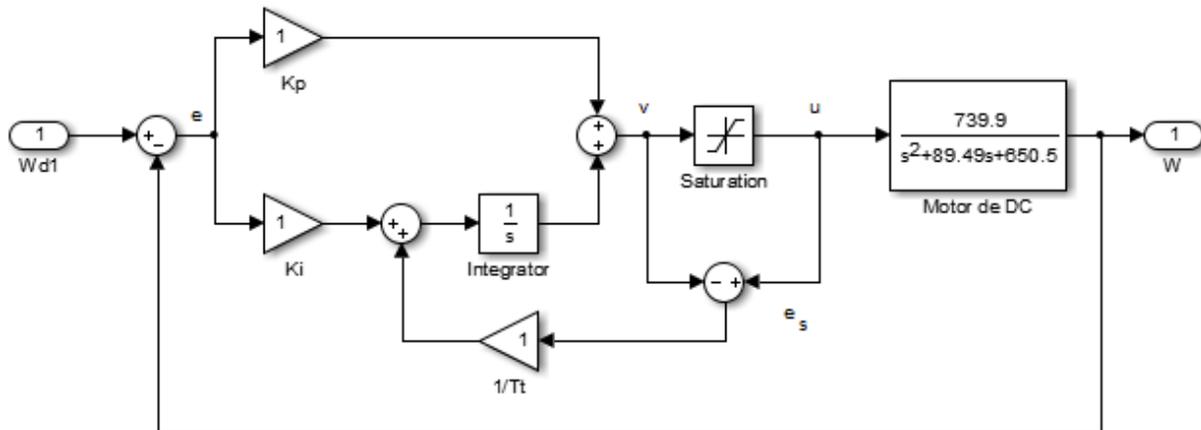


Figura 22. Modelo de control con saturación y Anti WindUp.

4. Resultados

4.1 Interfaz de Usuario

Para estimar las constantes de control se puede hacer uso de la herramienta *PID Tuning* de MATLAB, para trabajar con esta aplicación es necesario cargar en el Workspace la función de transferencia del sistema, con el siguiente comando $G=tf([739.9],[1 \ 89.49 \ 650.5])$, para poder importar el modelo de la planta y calcular la ganancias para el control Proporcional Integral, estos valores obtenidos serán enviados al controlador a través de una interfaz de usuario.

La Figura 23, corresponde a la interfaz de usuario en la que se obtendrá la respuesta del sistema y se enviarán las constantes del control PI, así como el tiempo de seguimiento de la acción Anti WindUp, la cual está conformada por los siguientes elementos:

- a) Salva los datos obtenidos de la respuesta del sistema en un archivo de Excel.
- b) Selecciona la variable a graficar, que puede ser:
 - Valor del PWM
 - Valor del contador del encóder
 - Posición Angular (radianes)
 - Posición (grados)
 - Respuesta de Control de Posición
 - Error de Posición
 - Velocidad Angular
 - RPM
 - Salida del control de velocidad
 - Error de velocidad
 - Corriente
 - Torque
 - Temperatura

- c) Inicia la prueba para obtener la respuesta del sistema.
- d) Envía las constantes de control y la referencia.
- e) Valores de las constantes de control y referencia.
- f) Área de grafico de la respuesta obtenida.
- g) Stop.

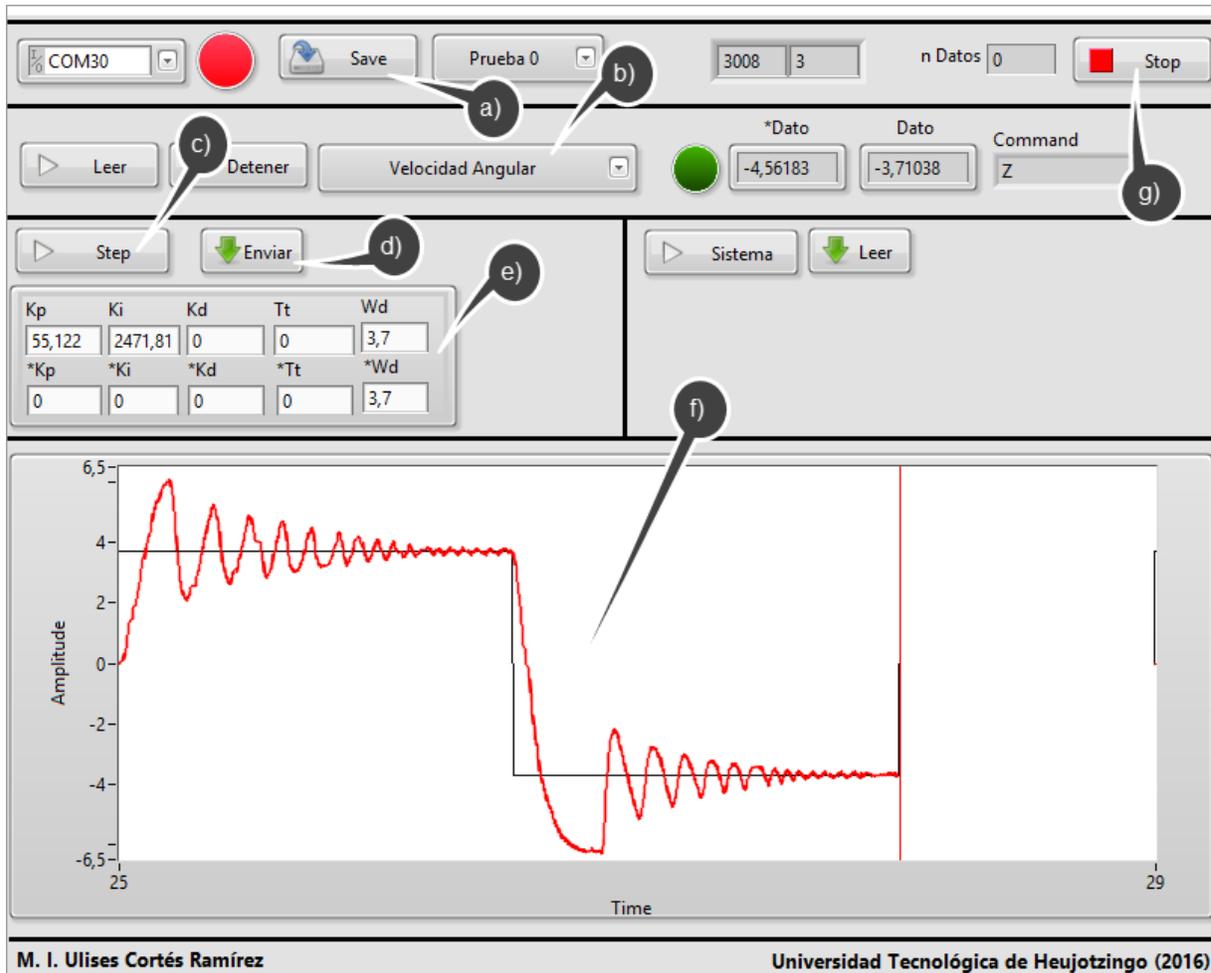


Figura 23. Interfaz de Usuario para obtener la respuesta del motor de DC.

Cuando todas las constantes son cero, el sistema trabaja en lazo abierto y no existe retroalimentación alguna, si el tiempo de seguimiento T_t es cero, la acción anti WindUp se desactiva. En esta interfaz de usuario se tiene la opción de elegir la variable a graficar durante la prueba realizada, como: velocidad angular, error de velocidad, salida de control $u(t)$, y algunas referentes a la posición del motor y torque.

4.2 Etapa de control

Para la estrategia de control se ha contemplado un microcontrolador PIC32MX320F128H del fabricante Microchip, el cual esta implementado con un núcleo de 32 bits con una frecuencia de trabajo de 80 MHz, se encuentra embebido en una placa de prototipado rápido Chipkit Uno32; estará a cargo de obtener las variables de control y procesar la estrategia de control, en la Figura 24 se muestra la implementación en lazo cerrado del sistema, para este caso CNT representa el contador del encóder y Wr es la velocidad angular real del motor, a través del módulo UART del

microcontrolador en un bus inalámbrico (Bluetooth) se envía a la interfaz de usuario la respuesta del sistema y se recibe el valor deseado de la velocidad angular W_d .

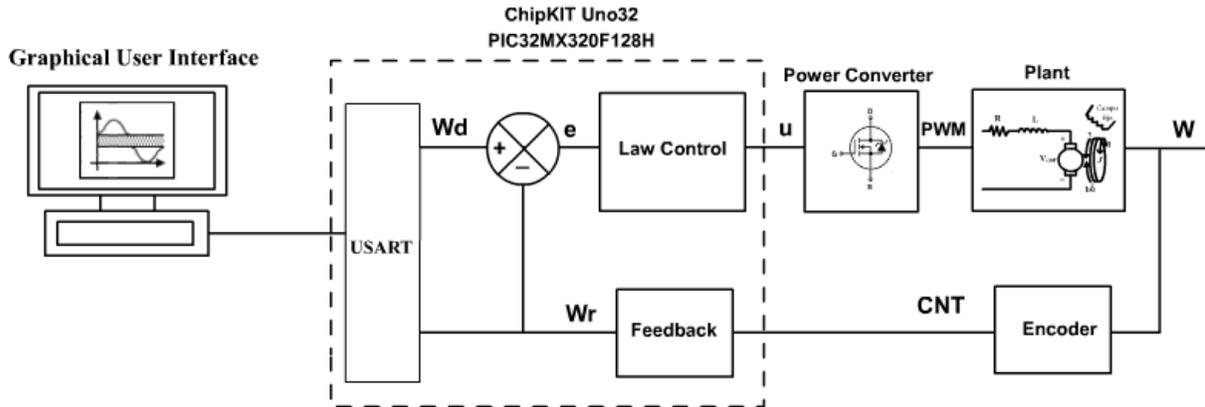


Figura 24. Esquema de Control.

4.3 Respuesta de Control PI

Para el control Proporcional Integral de la Figura 21, se realizaron tres pruebas con diferentes valores para las ganancias proporcional (K_p) e integral (K_i) como se muestra en la Tabla 1, para esta estrategia de control el tiempo de seguimiento (T_t) es igual a cero, cabe mencionar que bajo esta condición se desactiva la acción Anti WindUp, esto debido a que el recíproco de esta constante es multiplicada por el error de saturación (e_s), según la ecuación (14), por lo que un valor de cero arrojaría un resultado infinito a la entrada del integrador.

Tabla 1. Pruebas de Control PI.

	K_p	K_i	T_t
Prueba 1	6.0217	7.2579	0
Prueba 2	7.2579	72.332	0
Prueba 3	1.0617	9.426	0

En la Figura 25 (A), se muestra la respuesta del control PI, el trazo de color rojo corresponde a la respuesta en lazo abierto, para la primera prueba (color verde) el sistema tiene sobre amortiguamiento y el transitorio excede los 1.5 segundos; para el caso de la prueba 2 (color cian), la oscilación en el transitorio se han reducido tanto en tiempo como en amplitud, en la prueba 3 (color magenta) el transitorio ya no tiene oscilación y la respuesta es muy similar a la de lazo abierto con la diferencia que la velocidad real del motor está aproximada a la deseada (el error en estado estacionario es aproximadamente igual a cero); para el caso de estas tres pruebas podemos discernir en que para la prueba 2 el transitorio tiene una duración aproximada a 0.5 segundos, mientras que en la prueba 3 alcanza hasta un segundo, la desventaja es que una es rápida pero tiene oscilación y otra no tiene oscilación pero es lenta.

La Figura 25 (B), corresponde a la respuesta del controlador ($u(t)$) el cual para el caso de la prueba 1 alcanza valores aproximados a 40 rad/seg, y cuando la referencia pasa a un valor negativo alcanza una magnitud de -80 rad/seg, considerando que la velocidad máxima es de 8.7 rad/seg, para la prueba 3 no existen sobretiros a la salida del controlador, pero le toma más tiempo a la planta alcanzar el valor de referencia. Para el caso del error de velocidad angular (Figura 25 (C)) la prueba



3 es la que tiene menos oscilación, mientras que para el torque (Figura 25 (D)) la prueba 3 es la que tiene un mejor resultado, debido a que la prueba 1 y prueba 2 tiene oscilación, lo que generara un calentamiento y desgaste al motor de DC.

Para el caso del control PI la prueba 3 tiene un mejor resultado ya que no tiene oscilación tanto en la velocidad angular como en el torque del motor, ahora una desventaja existente es que el torque es menor comparado con las otras pruebas realizadas, esto significa que ante una carga tiene la posibilidad de que el motor pierda velocidad, o incluso podría llegar a frenarse con mayor facilidad.

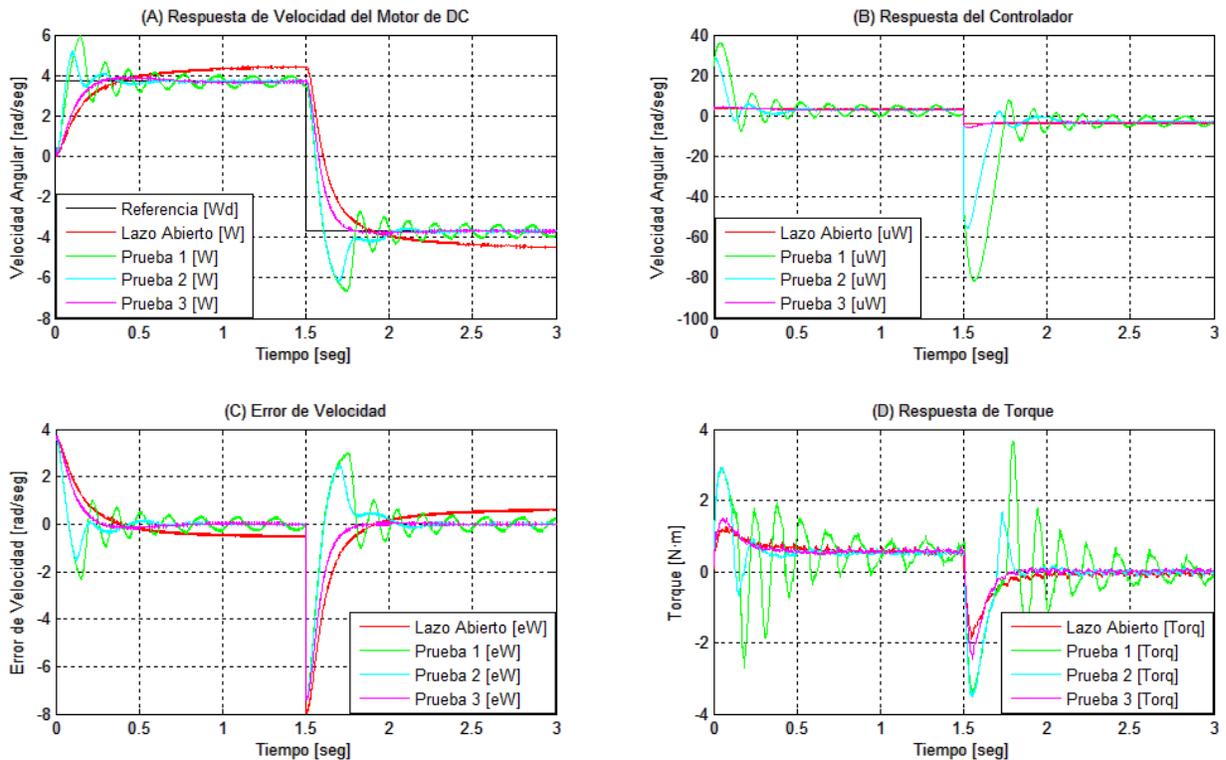


Figura 25. Respuesta de control Proporcional Integral.

4.4 Control PI con Anti Windup

Para el caso del control PI con la implementación de la acción anti WindUp mostrado en la Figura 26, también se realizaron tres pruebas, cada una de ellas tiene diferentes valores para el tiempo de seguimiento mostrados en la Tabla 2, para las constantes proporcional e integral se consideraron las ganancias de la prueba 2 del control PI, esto debido a que tiene una menor oscilación que la prueba 1 y su transitorio tiene una duración más corta con respecto a la prueba 3; ahora para este control si el tiempo de seguimiento T_t es mayor a cero se activara la acción Anti WindUp.

En la Figura 27 (A), se tiene la respuesta de velocidad angular, donde el trazo de color azul corresponde al control PI sin la acción Anti WindUp, para la prueba 1 (trazo de color verde) el tiempo de seguimiento (T_t) tiene un valor de 0.05, para la prueba 2 (trazo de color cyan) un valor de 0.025, es prescindible denotar que los sobretiros en la respuesta se han reducido y para el caso de la prueba 3 (trazo de color magenta), donde la constante de tiempo de seguimiento tiene un valor de 0.001 segundos, ya no hay oscilación.

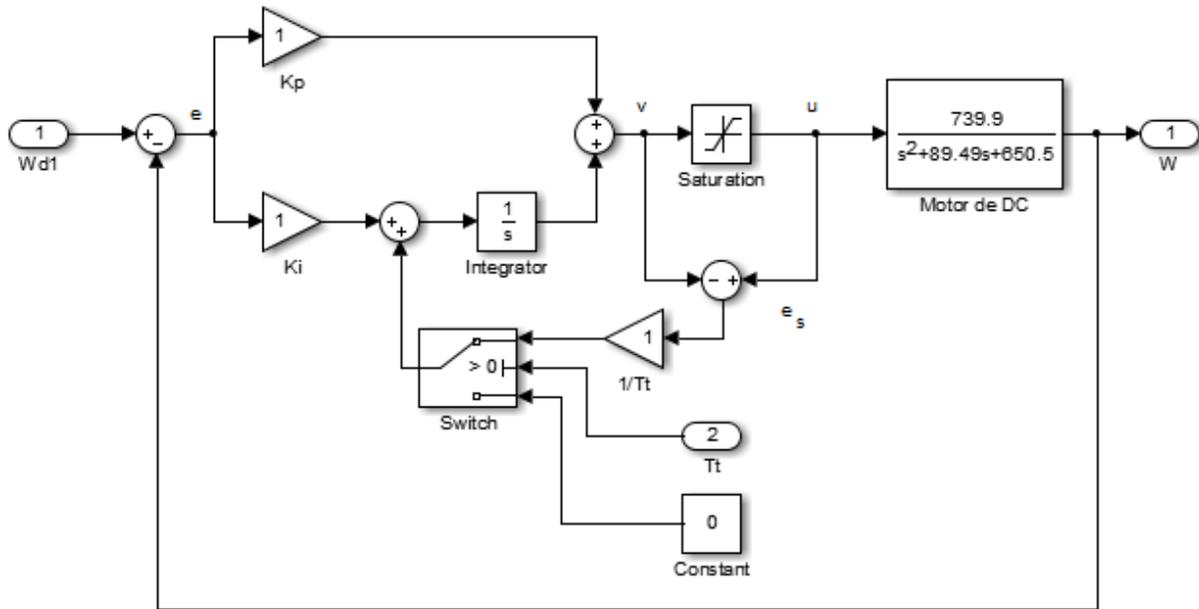


Figura 26. Control PI con desactivación de la acción Anti WindUp.

Tabla 2. Pruebas de Control PI con Anti Windup.

	Kp	Ki	Tt
Prueba 1	7.2579	72.332	0.05
Prueba 2	7.2579	72.332	0.025
Prueba 3	7.2579	72.332	0.001

El gráfico de la Figura 27 (B), corresponde a la respuesta del controlador, donde se puede ver que para el caso del control PI sin Anti WindUp (trazo de color azul) alcanza los valores de saturación tanto cuando es una referencia positiva y más aún cuando cambia a negativa, y para el caso de las pruebas de control PI con la acción Anti WindUp los niveles de saturación a la salida del actuador se reducen significativamente para el caso de la prueba 1 y prueba 2, para la prueba 3 son inexistentes, con lo que es posible denotar que la acción Anti WindUp tiene un resultado favorable en el actuador.

La Figura 27 (C) es la señal de error de donde podemos denotar que la respuesta con un mejor resultado es la prueba 3, ya que se reduce totalmente la oscilación que se generó en el control PI (Trazo azul), en el caso de la prueba 1 y prueba 2, esa oscilación sigue existiendo aunque con una menor proporción.

Para el caso del torque (Figura 27 (D)), es posible argumentar que con respecto a las pruebas del control PI sin Anti Windup, se ha mejorado su respuesta, esto debido a que se disminuye las oscilaciones y para el caso de la prueba 3 se reducen totalmente, dando como resulta un trabajo más eficiente a la planta evitando calentamientos a causa de los sobretiros a la entrada del actuador.

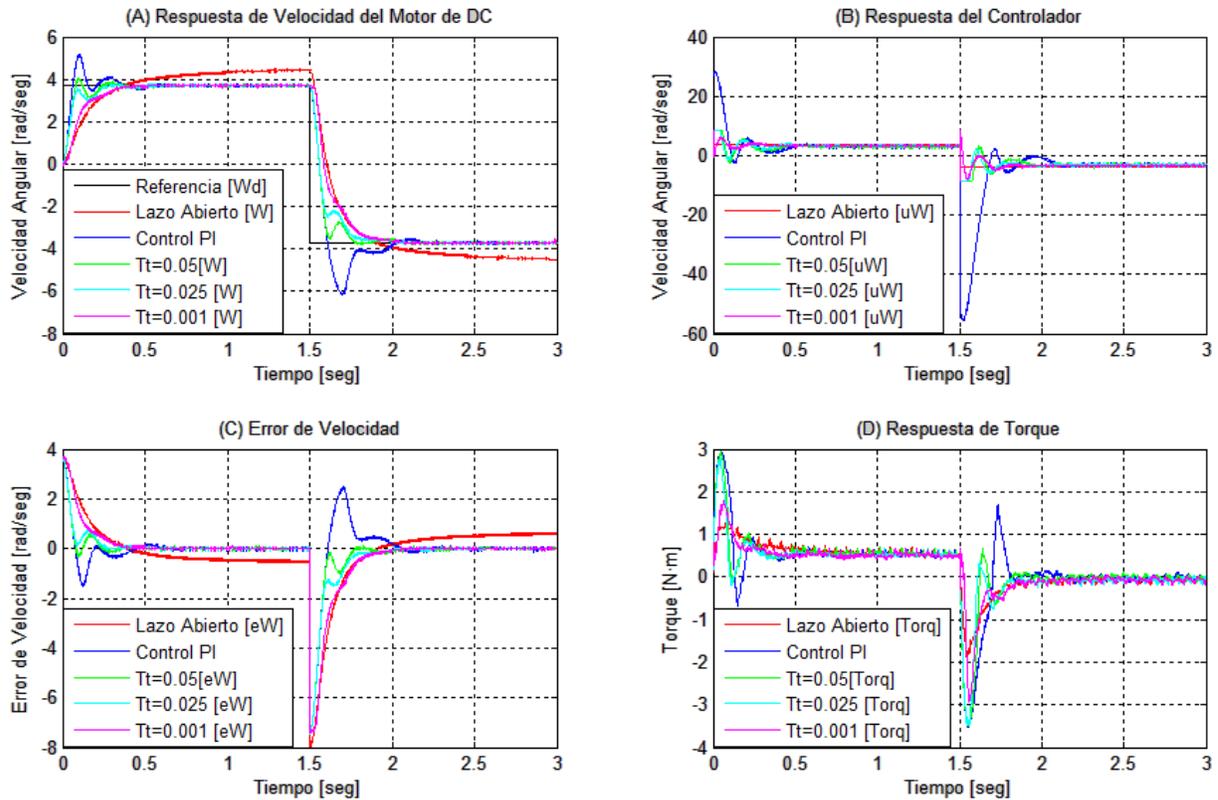


Figura 27. Prueba de control PI con Anti WindUp.

5. Conclusiones

Para este trabajo podemos enfatizar que la implementación en el control PI con la acción Anti WindUp se ha logrado reducir los sobretiros a la entrada del actuador, evitando también que se rebasen los límites de saturación, dando como resultado un mejor desempeño del motor de DC, ya que se reducen significativamente las oscilaciones en el torque, y con esto se logra alargar el tiempo de vida del motor de DC. De las pruebas realizadas en ambos controladores, es posible enfatizar que las que tuvieron un mejor resultado en ambos casos fue la prueba 3, de lo que es posible denotar de la Figura 28, que para el control PI sin la acción Anti WindUp el transitorio rebasa los 0.5 segundos, mientras que con la acción anti WindUp está por debajo de este valor.

En la Figura 29 para el caso del control Proporcional Integral con la acción Anti WindUp tiene un mayor torque, dando como resultado una mayor fuerza en la respuesta del motor de DC.

De esto podemos concluir que para la prueba del control PI quien tuvo un resultado favorable para el torque de la planta fue la prueba 2, pero, aunque la prueba 3 tubo oscilaciones y sobretiros a la entrada del actuador ($u(t)$) con la acción Anti WindUp se mejoró sustancialmente su respuesta, dando como resultado una respuesta sin oscilaciones y con un desempeño optimo en torque, de lo que es posible argumentar que se reducirá sustancialmente el riesgo de generar un daño físico en el motor de DC, debido a las oscilaciones en el torque.

En este trabajo se ha alcanzado un resultado sumamente favorable y será aplicado a un robot móvil con ruedas, donde el control de cada una de sus ruedas se implementará el control aquí planteado, dotando a la plataforma con movimientos precisos y continuos ante imperfecciones en el suelo donde se esté desplazando.



Como trabajo futuro se contempla implementar un control en cascada, con el que se controle la posición angular del motor de DC a través de un control PID, al igual se contempla que exista la acción Anti WindUp en el control de posición y un filtro en la derivada, con la finalidad de ser utilizado en las articulaciones de un brazo manipulador didáctico.

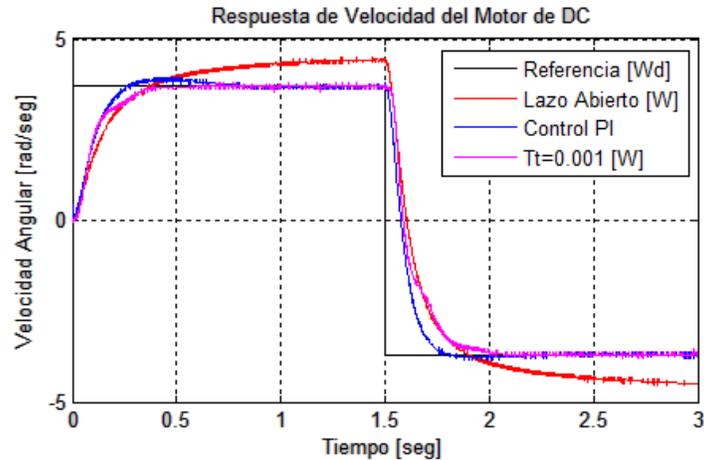


Figura 28. Respuesta del control PI sin y con Anti Windup.

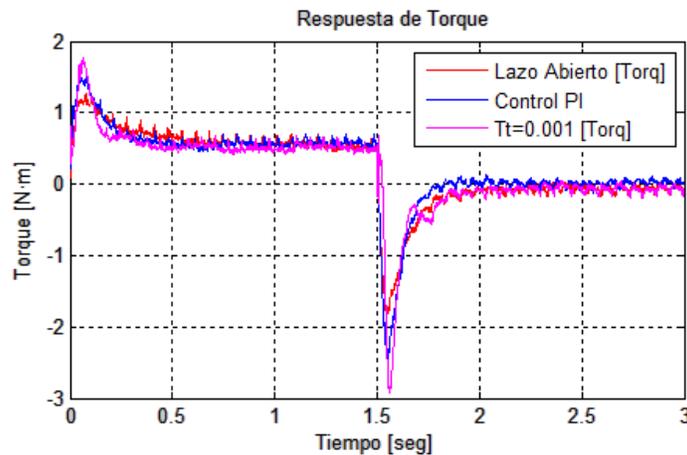


Figura 29. Respuesta de torque del control PI sin y con Anti Windup.

Referencias

- [1] I. A. Ruge Ruge, «Optimización de señal de control en reguladores PID con arquitectura antireset Wind-Up,» *Tecnura*, vol. 15, n° 30, pp. 24-31, 2011.
- [2] U. Cortés Ramírez, A. Benitez Ruiz, S. A. Arroyo Diaz y A. Castañeda Espinoza, «Control PID en su Forma Velocidad para Robot Móvil con Ruedas Tipo Diferencial,» *Simpósio Iberoamericano Multidisciplinario de Ciencias e Ingenierías*, vol. 1, n° 1, pp. 11-116, 2014.
- [3] MATHWROKS, «Control Tutorial for MATLAB & SIMULINK,» 2015. [En línea]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2011000300003&lng=es&nrm=iso. [Último acceso: 25 Agosto 2016].



- [4] I. I. Lázaro C., D. Roman M., J. Anzures M. y N. Pitalúa D., «Técnica de Estimación Paramétrica Aplicada a un Motor de CD Vía Series Walsh,» *Revista Académica de la FI-UADY*, vol. 13, n° 2, pp. 23-32, 2009.
- [5] U. Cortés Ramírez, A. Castañeda Espinoza, A. Benítez Ruiz y S. A. Arroyo Díaz, «Control de Movimiento de un Robot Móvil Tipo Diferencial, Robot uBot-32b,» *Congreso Nacional de Control Automático*, n° En tramite, pp. 314-319, 2015.
- [6] K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*, Madrid, España: Pearson, 2010.
- [7] K. J. Anström, «Control System Design Lecture Notes for ME 155A,» 2002. [En línea]. Available: <http://www.cds.caltech.edu/~murray/courses/cds101/fa02/caltech/astrom.html>. [Último acceso: 30 Agosto 2016].
- [8] K. J. Aström y T. Häggglund, «PID Control,» de *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, United State of America, ISA-The Instrumentation, System, an Automation Society, 1995, pp. 59-117.
- [9] A. Visioli, «Modified anti-windup scheme for PID controllers,» *IEE Proc.-Control Theory Appl.*, vol. 150, n° 1, pp. 49-54, 2003.



Control de temperatura bajo Norma ASTM D-3039 aplicado a pruebas de tensión en materiales en equipo de pruebas biaxiales

Hernández Cruz Noé, Lozano Guzmán Alejandro A., Morales Sánchez Eduardo, Moreno Guzmán Martín.

Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Instituto Politécnico Nacional, CICATA-IPN Querétaro, Cerro Blanco No. 141 Col. Colinas del Cimatario, C.P. 76090, Santiago de Querétaro.
noe_hdz_c@hotmail.com

Resumen

En el presente trabajo, se aborda el problema que contiene un equipo de pruebas biaxiales para poder realizar experimentos bajo condiciones de temperatura emitidas por la norma ASTM D-3039. Por lo anterior se diseñó e implementó de un sistema para proporcionar un flujo de aire caliente, basado en componentes electrónicos (triac's, optoacopladores, motores y resistencias calefactoras), manipulados mediante un tren de pulsos generado por un instrumento virtual desarrollado en el software LabVIEW y transmitido por una tarjeta de adquisición de datos. Lo anterior es aplicado a una cámara térmica contenida en un equipo de pruebas. Posteriormente se implementó una metodología con el objetivo de identificar la función de transferencia y el orden del sistema e implementar control PID con la ayuda de la instrumentación virtual proporcionada por el software en uso, que cumpliera las tolerancias que emite la norma ASTM D-3039. Mediante un proceso de sintonización de ganancias, se obtuvieron las respuestas del sistema apropiados. Como resultados se tiene un control PID de temperatura que cumple con la norma mencionada y su operación mediante una interfaz de usuario, que permite manipular y monitorear el sistema de control, dicha interfaz se compone de graficas de temperatura contra tiempo de respuesta del sistema a diferentes setpoints de temperatura deseados. Por otra parte, se realizó una prueba de tensión en una probeta de material compuesto que se expuso a diferentes temperaturas y a cargas constantes, para comprobar la variación de deformación en distintas condiciones.

Palabras clave: Control PID, Norma ASTM D-3039, prueba de tensión, deformación.

1. Introducción

En una prueba de tensión realizada mediante un equipo de prueba biaxial o uniaxial, la deformación es una variable dependiente de varios factores, como la fuerza aplicada, la humedad, la temperatura. Resulta útil el análisis de deformación en condiciones constantes de temperatura, ya que los materiales se exponen estos cambios en su campo de aplicación, por lo que es necesario el estudio de su comportamiento bajo estas circunstancias.

La norma ASTM D3039 está referida a un método para llevar a cabo una prueba de tensión en materiales, donde se determinan las condiciones y tolerancias de temperatura (± 3 °C) idóneas para poder realizar una prueba sobre un material del modo más apropiado y eficiente.

Llevar a cabo un sistema que permita controlar la temperatura para realizar una prueba biaxial y que cumpla con la norma, resulta muy útil para el análisis de deformación obtenido en cualquier

prueba realizada. El sistema de control se aplicó a una cámara térmica contenida por un equipo de pruebas biaxiales.

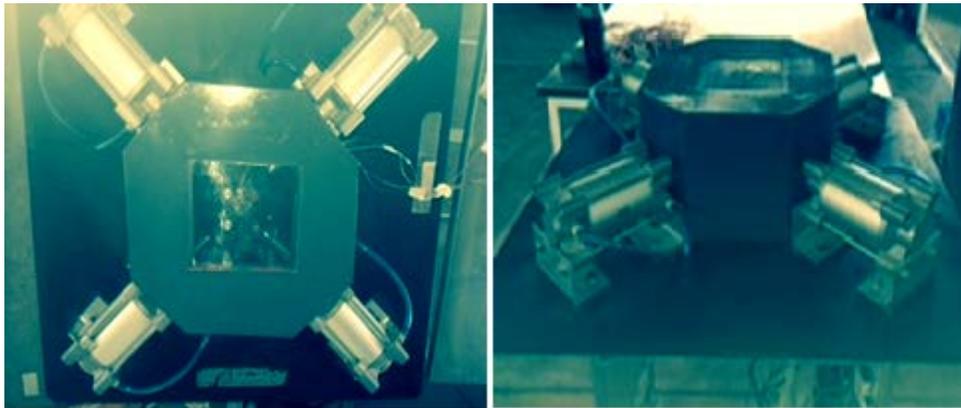


Figura 1. Equipo con cámara térmica.

La metodología que se ha seguido, consistió como primer paso la identificación del problema, recolección de elementos disponibles, acondicionamiento de señales electrónicas. Posteriormente, se trabajó en la identificación del sistema a controlar, con la finalidad de encontrar su función de transferencia, se calcula su función de transferencia de manera experimental y con base al método de mínimos cuadrados. Como paso final, se implementa una interfaz de usuario que contiene un control PID. Sus constantes son encontradas sintonizado el sistema de control de manera heurística.

Con la sincronización encontrada, se realizaron pruebas de tensión sobre una probeta de material anisotrópico para comprobar que deformaciones a diferentes temperaturas varían.

2. Diseño del sistema calefactor

Los sistemas de temperatura se componen de diferentes de componentes, según la aplicación y requerimientos. Para nuestro sistema, los componentes son: una pistola con resistencias calefactoras internas alimentadas a 127 Volts de corriente alterna, un motor alimentado a 17 Volts de corriente directa, los componentes integrados, forman la pistola de aire caliente y es el suministro de calor.

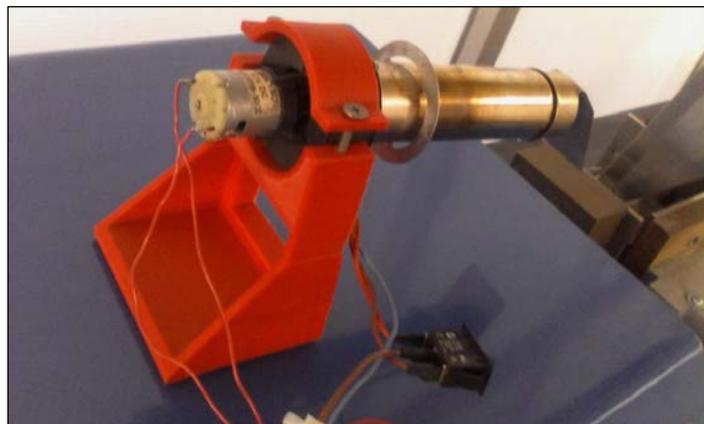


Figura 2. Pistola de aire caliente formada por un motor y resistencias.



Como variable que nos permite controlar la temperatura, tenemos el voltaje de las resistencias (127 VAC), para lo cual se propuso un circuito electrónico que proporciona una señal PWM a un ciclo de trabajo de 10 Hertz que es modificable mediante una interfaz realizada con el software LabVIEW y una tarjeta de adquisición de datos NI USB 6009.

En la siguiente figura se muestra el circuito detector de cruce por cero, propuesto como un generador de señal PWM a una frecuencia determinada.

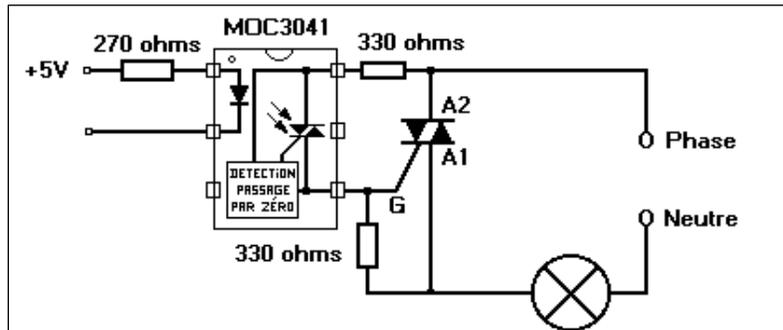


Figura 3. Circuito electrónico detector de cruce por cero.

2.1 Diseño e implementación de software para control de temperatura.

La señal PWM es generada mediante un puerto digital de la tarjeta de adquisición de datos NI USB 6009 de *National Instruments*, además el equipo la utiliza para la manipulación de los actuadores por medio de otros puertos que contiene.

Se diseñó e implementó una pequeña interfaz de usuario en el software LabVIEW, que es la encargada de generar la señal PWM a 10 Hertz en su ciclo de trabajo máximo funcionando como un tren de pulsos ON-OFF.

La interfaz desarrollada contiene controles para la frecuencia deseada (10 Hertz) para el PWM, el porcentaje de trabajo del ciclo deseado y botones de STOP. Dos gráficas para visualizar el comportamiento de las señales de salida e entrada.

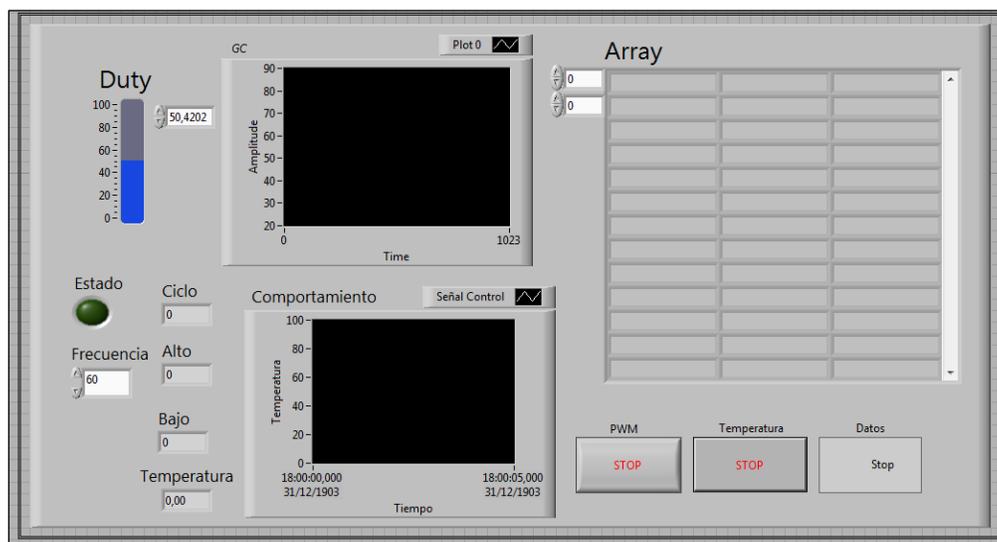


Figura 4. Interfaz para generar señal PWM.



Los bloque de programación se visualizan a continuación, donde se utilizan ciclos FLAT SECUENSE para darle la secuencia de tiempos y estado de la señal PWM, todo lo anterior en un ciclo WHILE, con su respectivo cálculo de tiempos y frecuencia.

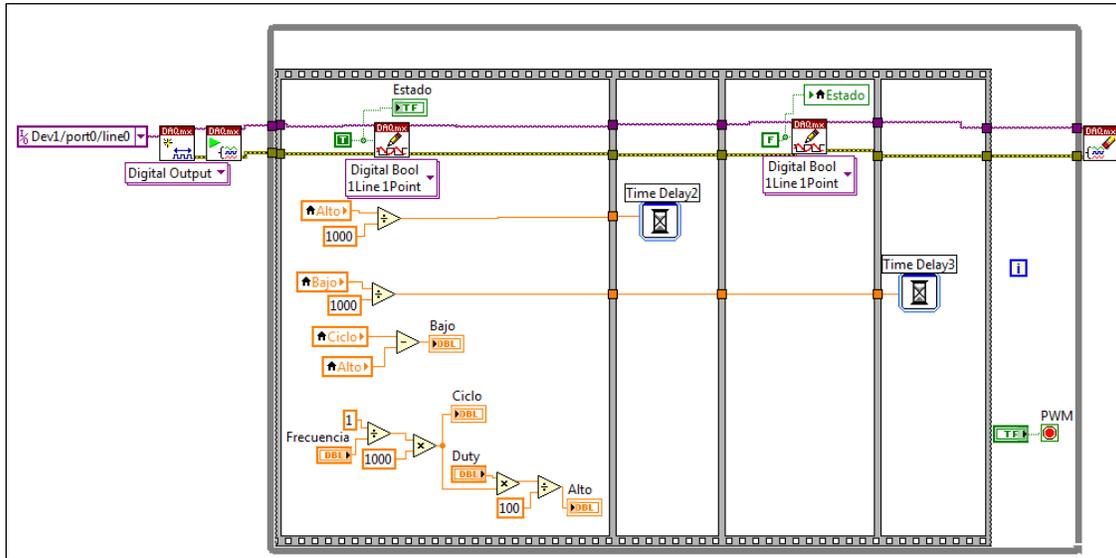


Figura 5. Diagrama a bloques de interfaz PWM.

En la adquisición de temperatura, se utiliza un termopar tipo k, en el diagrama a bloques de programación, se obtienen datos de temperatura cada segundo para ser capturados en una base de datos, lo anterior nos sirve para posteriormente analizar la respuesta del sistema y calcular su función de transferencia.

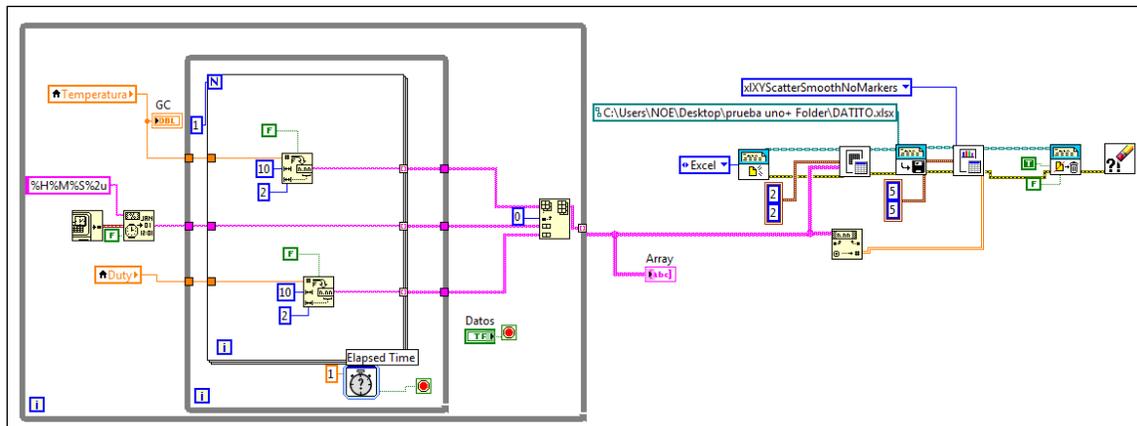


Figura 6. Diagrama a bloques para recolectar datos.

2.2 Función de transferencia del sistema.

Para la sintonización del control PID, es necesario conocer el tipo de sistema, así como su función de transferencia en base a los datos obtenidos en la etapa anterior. se aplicó el método de



mínimos cuadrados para conocer las características del sistema bajo una entrada escalón obteniéndose las siguientes gráficas.

Por el tipo de respuesta del sistema, se propone un sistema de primer orden de la forma:

$$Y(s) = \frac{k}{\tau s + 1} U(s) \quad (1)$$

La solución de la ecuación en el tiempo de la ecuación es dada por:

$$Y(t) = k(\Delta u) \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad (2)$$

Con la solución anterior, y aplicando mínimos cuadrados en Excel y se obtiene los valores de k , y τ para todas las gráficas realizadas respectivamente, el modelo está en color verde y se compara con los experimentos:

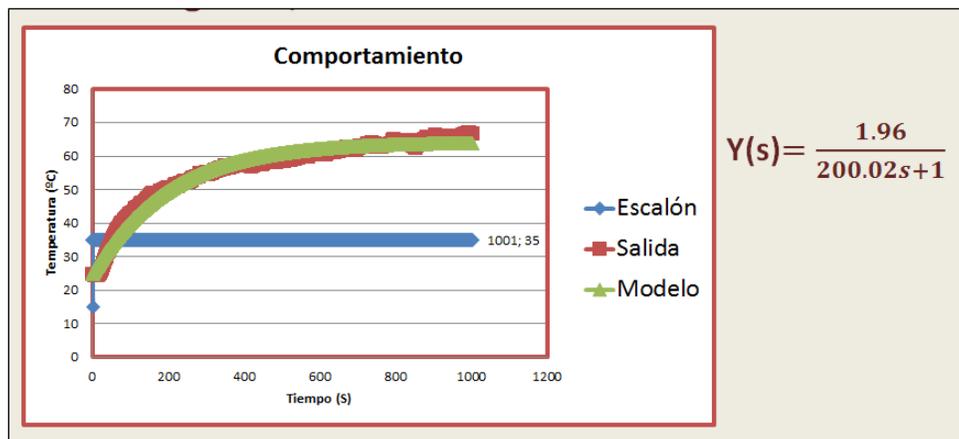


Figura 7. Respuesta del sistema a una entrada escalón de 35%

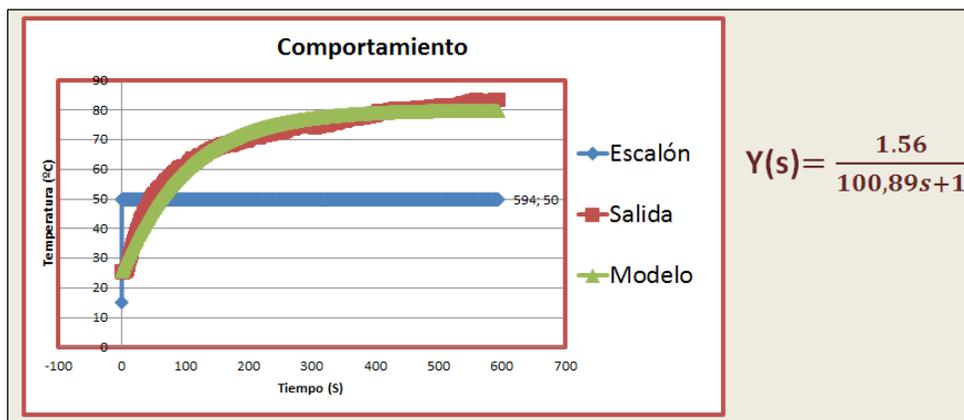


Figura 8. Respuesta del sistema a una entrada escalón de 50%

3. Resultados

La cámara térmica del equipo biaxial fue el lugar de experimentos del sistema desarrollado. Para garantizar la homogeneidad de temperatura den la cámara, se distribuyeron 3 termopares en diferente zona y se hizo variar la temperatura para conocer respuesta en cada sensor.



Figura 9. Distribución de termopares dentro de cámara

La grafica de resultados de homogenización se muestra en la figura 9 para variaciones de temperatura, donde se comprueba que no existen diferencias dentro de las áreas de la camara térmica del equipo.

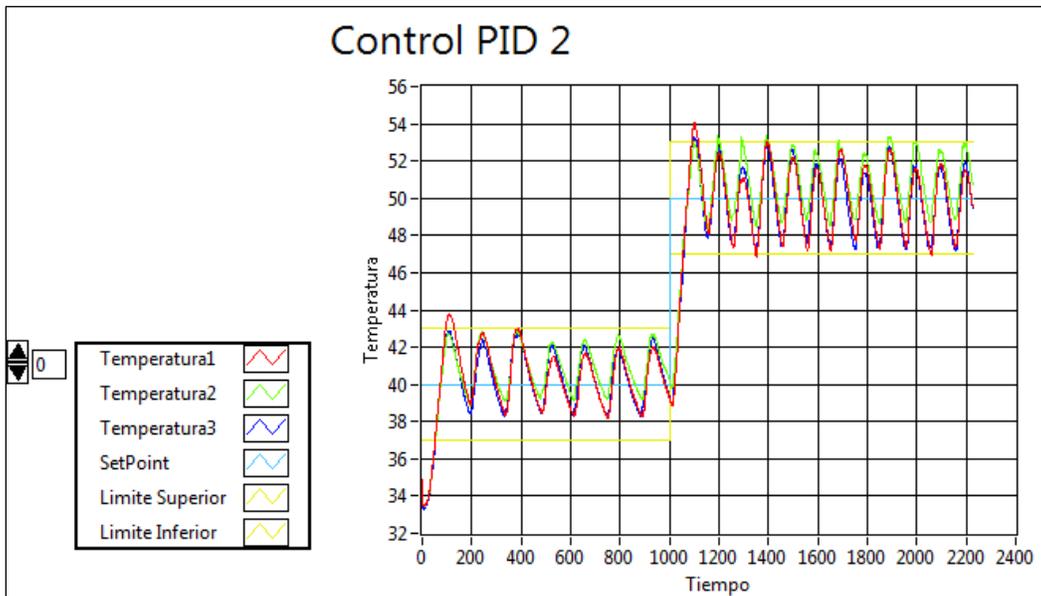


Figura 9. Distribución de termopares dentro de cámara



La sintonización heurística nos dio como resultado un control de temperatura del tipo PID que cumple con la tolerancia demandada por la norma ASTM D3039. En las siguientes figuras se muestran los resultados de forma gráfica.

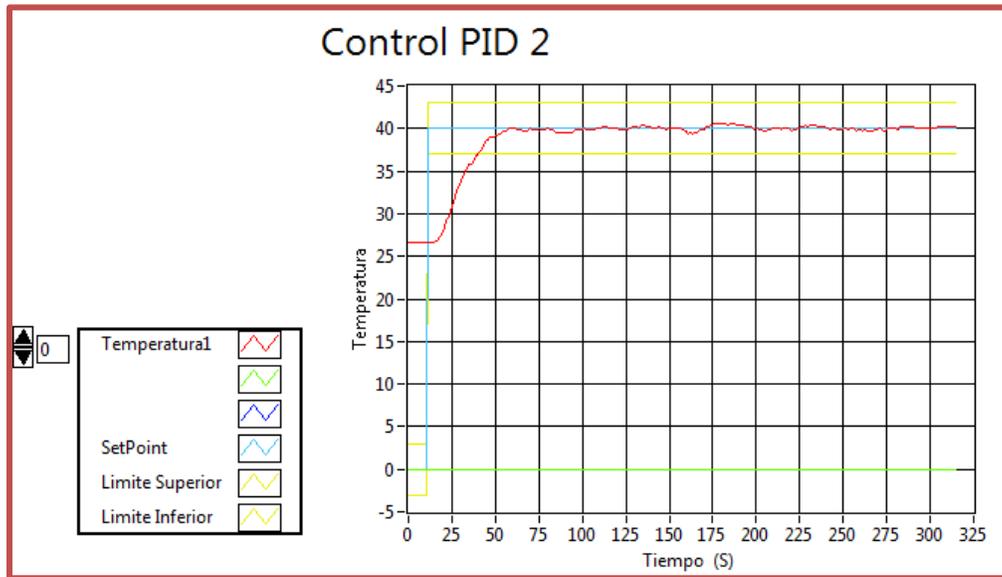


Figura 10. Respuesta de control de temperatura obtenido

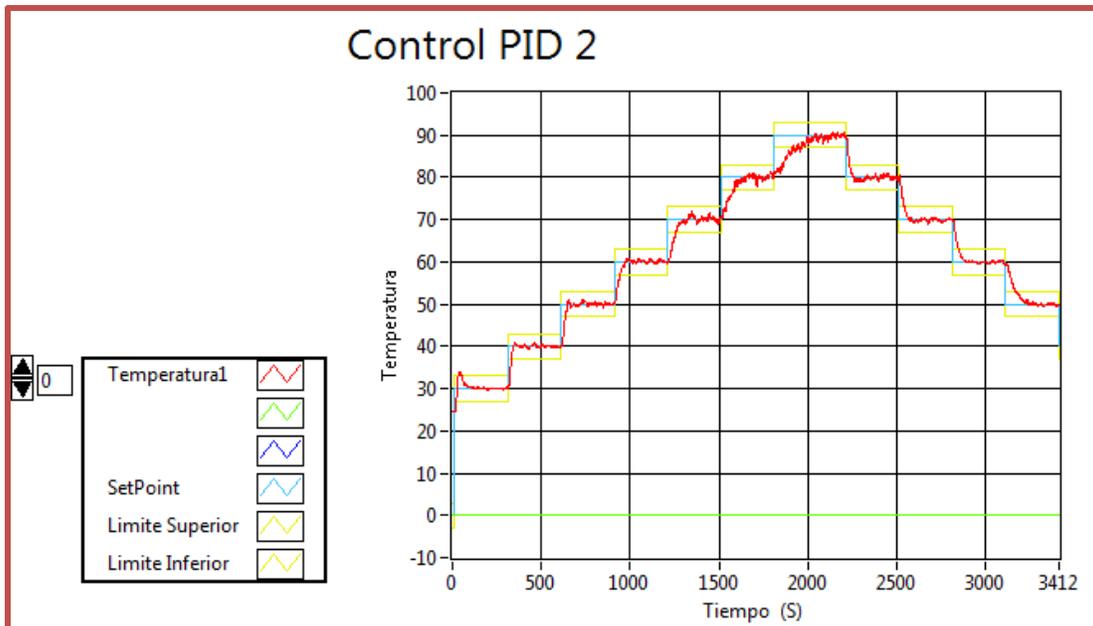


Figura 11. Respuesta del sistema bajo múltiples puntos de referencia

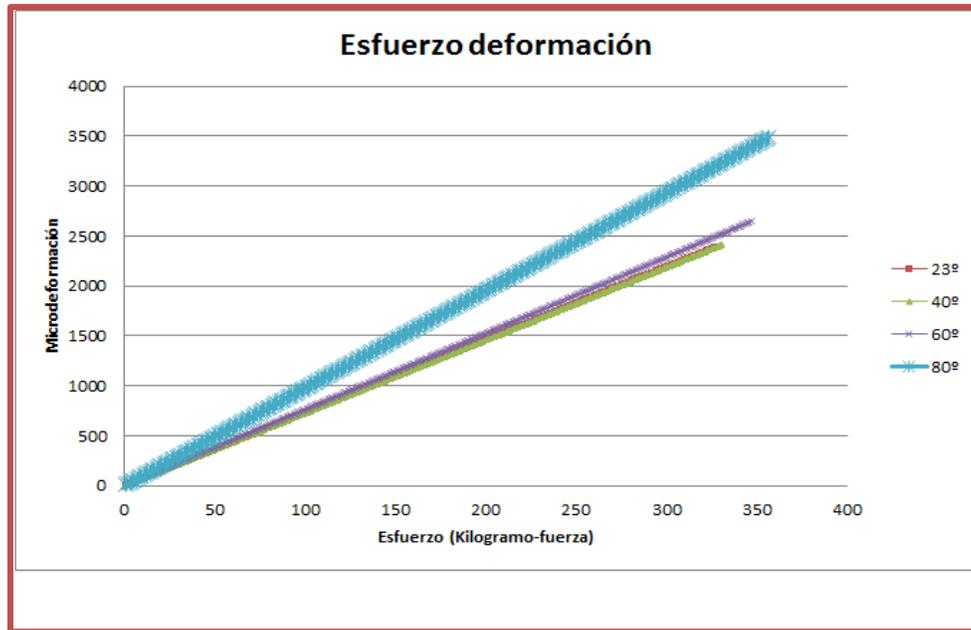


Figura 12. Prueba de tensión a diferentes temperaturas

4. Conclusiones

Como conclusiones, al realizar experimentos de pruebas de deformación en el equipo, se comprueba la influencia que tiene la temperatura en los resultados, de igual manera resulta muy interesante realizar pruebas a diferentes condiciones, con lo anterior se pueden obtener las características de comportamiento mecánico del material que se está analizando. Los resultados de deformación van a variar dependiendo del material, de las condiciones y de la carga que se aplique en un experimento, sin embargo el controlar la temperatura, garantiza resultados más confiables.

Referencias

- [1] B. Vargas Tamani. (2007). Obtención de Modelos de Procesos Mediante Métodos de Identificación Recursiva. Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- [2] NI cDAQ-917X User Manual, National Instruments, May 2013.
- [3] NI 9219 Operating Instructions and Specifications, National Instruments, February 2009.
- [4] NI-9234 User Manual, National Instruments, Oct 2015.
- [5] A. Martínez Bueno. (2011). Identificación experimental de sistemas. Universidad de Alicante, España.
- [6] K. J. Astrom, P. Eykhoff. System Identification-A Survey; Great Britain.
- [7] Plascencia Torres I. Fabiola. (2012). Diseño e integración de un sistema con interfaz virtual para un dinamómetro de banco utilizado en motores de combustión interna (tesis de grado). Universidad Nacional Autónoma de México.
- [8] Sánchez Rallo J. Sanchís Aicart M. Ángel, Sanz Carnicero E. (1999). Introducción y aplicación en LabVIEW para el control de un proceso continuo mediante PID. Universitat Politècnica de Catalunya, España.



Control difuso de velocidad y distancia de proximidad mínima de un robot móvil para usuarios con capacidades diferentes implementado en cómputo móvil

Sánchez Medel Luis Humberto¹, Juan Manuel González¹,
Blanca Isela Sánchez Vázquez¹, Daniel Rodríguez Moctezuma¹,
Miguel Ángel Solís Jiménez²

Instituto Tecnológico Superior de Huatusco, Departamento de Ingeniería en Sistemas Computacionales, Departamento de Ingeniería industrial

Resumen

La robótica de rehabilitación es una combinación de la robótica industrial y la rehabilitación médica, en donde a través de algoritmos, elementos mecánicos, circuitos eléctricos y electrónicos han permitido dar origen a las sillas de ruedas inteligentes (IWS) para aquellos usuarios que no pueden operar una silla de ruedas eléctrica (EPW) por métodos de entrada habituales como el joystick, llevando el concepto de diseño universal a las tecnologías de asistencia. Un parámetro a considerar en los sistemas de control de las IWS, es la determinación de la distancia mínima de contacto y la velocidad máxima permisible del usuario, mismos que no se adaptan conforme a la experiencia del usuario. Este artículo propone la determinación de la distancia de contacto mínima y velocidad en base a un sistema difuso implementado en un robot móvil, el cual es controlado mediante la inclinación de la cabeza del usuario y permite identificar 5 tipos de instrucciones diferentes por un Smartphone para aquellos usuarios que no puedan optar por un control tradicional.

Palabras clave: Silla de ruedas inteligente, tecnología de asistencia, interacción hombre robot.

1. Introducción

Proveer la correcta asistencia en un ambiente de control compartido es una tarea compleja, por su naturaleza, la asistencia es multifacética y dependiente de diversos factores incluyendo la tarea en mano, el estado del usuario, el ambiente y las capacidades de asistencia [1]. El aprendizaje de asistencia por demostración (LAD). Una silla de ruedas inteligente debe de enfrentar la difícil decisión no solo de asistir a un paciente, sino cuando y como interferir, ya sea para realizar tareas de bajo control mientras que el usuario es primariamente responsable de decisiones en los niveles más altos [2].

Actualmente los diversos objetos y sistemas que nos rodean están diseñados para que la mayoría de los usuarios puedan utilizarlos con facilidad, sin embargo esto no siempre ha sido así, fue en 1985 cuando Ron Mace, fundador de la ideología del diseño Universal [3] y la Universidad de North Carolina en 1997 [4] orientaron el diseño y construcción de un producto para que todas las personas puedan hacer uso del mismo.

El diseño Universal es el diseño de productos y ambientes que son usables para todas las personas, en la extensión más amplia posible, sin la necesidad de adaptación, [5]. El UD se basa en 7 principios propuestos por la universidad de North Carolina [6] y [7], los cuales son:



- Principio 1: Uso equitativo
- Principio 2: Flexibilidad de uso
- Principio 3: Simple e intuitivo
- Principio 4: Información perceptible
- Principio 5: Tolerancia al error
- Principio 6: Bajo esfuerzo físico
- Principio 7: tamaño y espacio para aproximación del uso

Los conceptos: “forma”, “característica”, “atributo” e “interface al usuario” e inclusive el término “todos los usuarios” juegan un papel importante en la descripción de un objeto a través del UD. [8]. La forma física es el diseño de la apariencia física de un objeto, tanto en tamaño como en proporción o estructura. Una Característica es cualquier elemento distinguible en un diseño en cualquier escala de diseño, son categorizados mas no todos pueden ser medidos solo descritos. Un atributo es una característica cuantificable como la altura, ancho, color, textura y condición que define la proporción, apariencia y otras cualidades. La interface al usuario. - incluyen una variedad de control y hardware, los cuales pueden ser configurables u operativos.

El concepto “todos los usuarios” empleado en el UD, hace referencia a que un objeto debe de tener la capacidad de emplearse por cualquier persona, considerando sus capacidades e incapacidades y la población a la que pertenece. La capacidad de una persona es la calidad en la realización de alguna función distinguiéndose por tipo y magnitud; la incapacidad se describe en términos mentales o físicos en donde el usuario tiene impedimento para realizar actividades cotidianas sin embargo la dis-capacidad no está asociada con el mismo tipo o nivel de incapacidad [8]. Las habilidades de una persona se clasifican de acuerdo a [9] en motoras, mentales, de sensación y percepción y comunicación.

Tabla 4 Evolución de las estadísticas en México y porcentaje de población con discapacidad

Fuente	Año	Concepto medio	Porcentaje
Censo	1900	Defectos físicos y mentales	0.20
Censo	1910	Defectos físicos y mentales	0.21
Censo	1921	Defectos físicos y mentales	0.65
Censo	1930	Defectos físicos y mentales	0.66
Censo	1940	Defectos físicos y mentales	0.54
Censo	1980	Ausentismo escolar por invalidez	2.80
Encuesta nacional de Inválidos	1982	Invalidez	0.03
Conteo de población	1995	Discapacidad	2.33
Registro nacional de menores	1995	Discapacidad	6.35
Censo	2000	Discapacidad/limitación	1.84
Encuesta nacional de salud	2000	Discapacidad	2.30
Encuesta nacional de evaluación del desempeño	2002	Discapacidad/dificultad	9.00
Encuesta Nacional de salud y nutrición	2006	Discapacidad/dificultad	9.00
Censo	2010	Discapacidad/dificultad	5.10
Encuesta nacional de ingresos y gastos de los hogares	2010	Discapacidad/dificultad	5.10

De acuerdo al censo Nacional de Población 2010, en México habitan 112'336,538 de personas [10]. Los ejercicios censales que han incluido datos sobre el número total de discapacitados desde 1900 se muestran en la Tabla 1; se observa que en el anterior ejercicio censal 2000 se obtuvo un 1.8% de población con discapacidad y creció a 5.1% en el ejercicio censal 2010, por lo que el número total de personas con discapacidad va en aumento. Actualmente se considera personas con discapacidad de acuerdo al INEGI a aquellas que cumplan las siguientes características:

- Población con dificultad para caminar, moverse, subir o bajar
- Población con dificultad para ver
- Población para oír o escuchar



Población con dificultad para hablar, comunicarse o conversar
Población con dificultad para atender su cuidado personal
Población con dificultad para poner atención o aprender cosas sencillas
Población con limitación cerebral

Entender la habilidad y discapacidad de una persona es crítico para apreciar el impacto que tiene una forma en funcionamiento, empezando con la naturaleza de la incapacidad del diseño rutinario permitiendo a la naturaleza de los diseños especializados y universales. La tecnología de asistencia es esencialmente tecnología que sirve para apoyar a las personas con discapacidad [11] y son una expresión genérica que abarca los sistemas y los servicios relacionados a la entrega de productos y servicios de apoyo [12]. La tecnología de asistencia (AT) e ingeniería de rehabilitación de dispositivos para personas con discapacidad tienen 3 tipos de aproximaciones: el diseño hecho para la población más grande, diseño para sub-poblaciones y el diseño para individuos en específico [3].

2. Estado del arte

La interacción hombre robot hace referencia a como un robot puede interactuar no solo con su usuario sino además con el medio ambiente de trabajo y otros usuarios, es decir: parcialmente observable, determinístico, episódico y dinámico.

2.1 Sillas de ruedas multimodales

La mayoría de los proyectos con IWs no incluyen alguna referencia de la adaptación del usuario a la silla de ruedas o como mejorar la interface basada en la interacción del usuario con la IWs, sacrificando así el confort y la usabilidad regular de la silla de ruedas en orden de resolver problemas relacionados con la robótica. Las IWs que son controladas por otras formas de control adicionales al joystick son conocidas como sillas de ruedas multimodales MMIWs, los controles pueden ser: movimiento de los ojos, cejas, rostro, cabeza, manos, dedos, lengua o por voz.

El proyecto IntellWheels propone un diseño centrado en el usuario mediante un control multimodal inteligente/adaptativo que ayude a mejorar la movilidad del usuario [13] y [14]. El desarrollo de IntellWheels propone el diseño centrado al usuario en donde el confort, la seguridad y área de trabajo son las principales prioridades, sin comprometer costo o un hardware rígido inadaptable a otras sillas de ruedas. La interface multimodal al usuario es mediante un joystick, teclado, pantalla táctil, gestos faciales, expresiones faciales, voz y CBI comercial. La interface multimodal (MMI) permite que el usuario defina sus comandos de entrada, a través de entradas homogéneas (un solo tipo de dispositivo de entrada) o heterogéneas (diferentes dispositivos de entrada).

El control multinivel esta dividió en 3 capas: estratégica (planeación de metas, planeación de camino empleando A*), táctica (control de acciones básicas y velocidad angular) y control básico. Los sensores empleados son láser y ultrasónicos ubicados en áreas en donde el usuario no haga uso de ellas e interconectados mediante una tarjeta controladora Arduino y un controlador de motor como se muestra en la Figura 1, el dispositivo que realiza el procesamiento de datos es una computadora. El enfoque del proyecto es el acercamiento de una IWs al público e investigadores, por lo que las pruebas realizadas son cualitativas en base a cuestionarios contestados por investigadores de diversos niveles y su comparación con otras IWs.

Una IWs es desarrollada en el Tecnológico de Orizaba [15] y [16]. Consiste en el control de una silla de ruedas a través de una interfaz multimodal, siendo las interfaces comandos por voz como se muestra en la Tabla 2, lengua, joystick y botones.

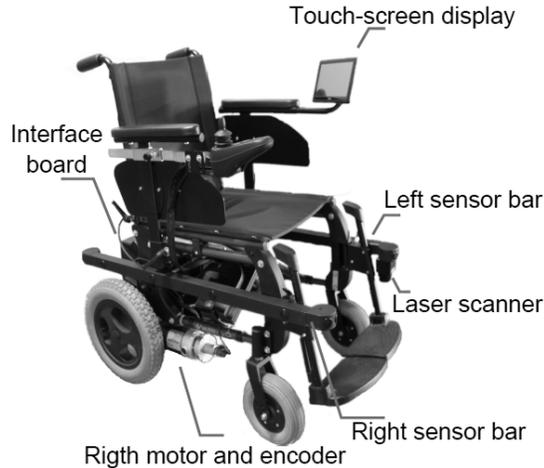


Figura 1 Componentes del proyecto IntelIWheels

Tabla 5 Comandos de voz de la ITO-IWs

Comando	Acciones	Comando	Acciones
“One”	Enciende el sistema	“Right”	Gira a la derecha
“Forward”	Mueve la IWs adelante	“Down”	Frena los motores
“Backward”	Mueve la IWs atrás	“Up”	Apaga los motores
“Left”	Gira a la izquierda		

El sistema emplea 26 sensores ultrasónicos HC-SR04 ubicados como muestra la Figura 2. Los sensores y los sistemas multimodales de entrada homogénea (voz, joystick, botón) son interconectados con un Arduino Mega ADK, el cual sirve como tarjeta de adquisición y control embebida. Un aspecto importante es que el sistema multimodal fue probado en usuarios con lesión de médula completa e incompleta en 5 tipos A a E empleando un simulador, obteniendo medición en colisiones promedio por vuelta, tiempo en completar la prueba, velocidad y método de control.

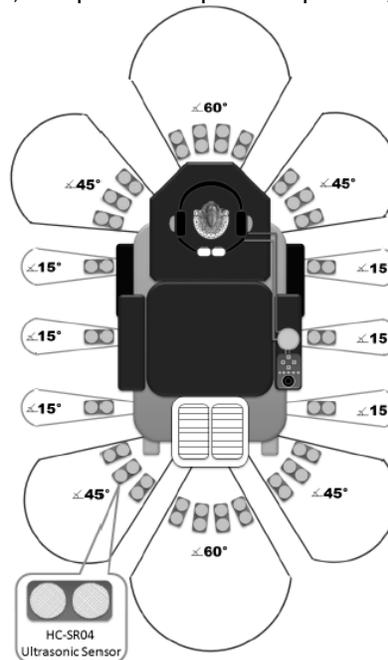


Figura 2 Localización de los sensores ultrasónicos de la IWs



El proyecto IATSL-IWs del Instituto de Rehabilitación de Toronto se enfoca al control de una silla de ruedas en adultos con dificultades cognitivas [17], [18] y [19]. El sistema emplea una EPW modificada para poder ser controlada por el joystick háptico como lo muestra la Figura 3. Adicionalmente el sistema da una retroalimentación al usuario de forma auditiva. La IWs es probada en ambientes reales, basados en la asistencia para conducir sistemas eléctricos de potencia en interiores (PIDA) [20].

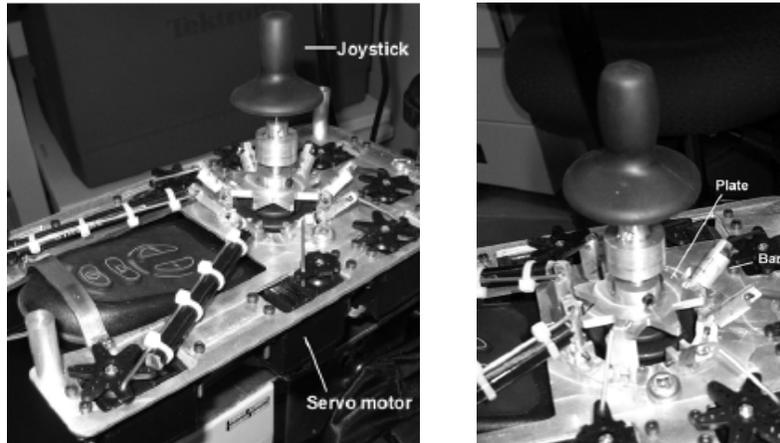


Figura 3 Interface Háptica

El sistema tiene 3 tipos de modos de operación; el modo básico se activa de forma automática cuando la silla esta aproximadamente a 0.3 metros de un objeto y se ha detenido previamente avisando al usuario del posible impacto mediante retroalimentación auditiva y háptica en el joystick, la velocidad máxima es controlada así como la distancia mínima permisible por la silla de ruedas. El modo de corrección de volante, si la silla se halla a menos de 0.3 metros y el usuario no se ha detenido, entonces automáticamente girara sin bajar la velocidad o frenar; en el modo automático, la silla realiza la tarea de manejo de forma automática y solo se detiene mediante el joystick.

El proyecto IATSL-IWs también toma en consideración las preferencias del usuario al momento de elegir el modo de control, destacando que en ciertos ambientes de trabajo el usuario desearía estar al control (pasillos principalmente), mientras que en otros ambientes (elevadores o puertas) el usuario prefiere un sistema de apoyo, por lo que es necesario un sistema dinámico de selección.

2.1 Sillas de ruedas inteligentes con enfoque comercial

Ha existido una baja tendencia a crear IWs comerciales debido a que existe una abertura entre los académicos investigadores, fabricantes y usuarios [21], razón por la cual han surgido proyectos que buscan ser un puente entre estos 3 sectores como [22], [23] y [24].

El proyecto SYSIASS tiene el objetivo de reducir la barrera técnica para realizar investigación sobre la detección de obstáculos mientras que al mismo tiempo busca mantener una ruta simple para la comercialización [23]. Esta IWs hace uso de nodos de sensores de presencia infrarroja y ultrasónica controlador por un Arduino Nano, los cuales se comunican entre sí mediante un protocolo RS-485 como lo muestra la Figura 4. El uso de un protocolo de comunicación permite aumentar el número de nodos sensores, sin embargo la frecuencia de actualización de cada sensor es de 80 ms, esto debido a la naturaleza del uso del protocolo, control secuencial y el tiempo de adquisición de cada sensor.

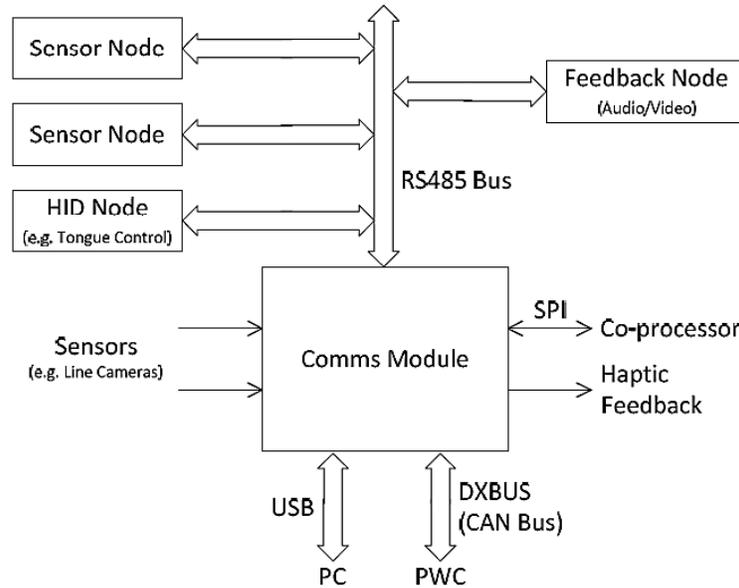


Figura 4 Topología del proyecto SYSIASS

El control de la IWs es de tipo joystick como lo muestra la Figura 5, sin embargo es posible implementar entradas multimodales modificando el programa de control y aumentando un nodo, sin embargo este sistema no es adaptable a varios modelos de sillas de ruedas solo a aquellas que cuenten con el controlador Dynamic Controls, su sistema de control principal es mediante una computadora.

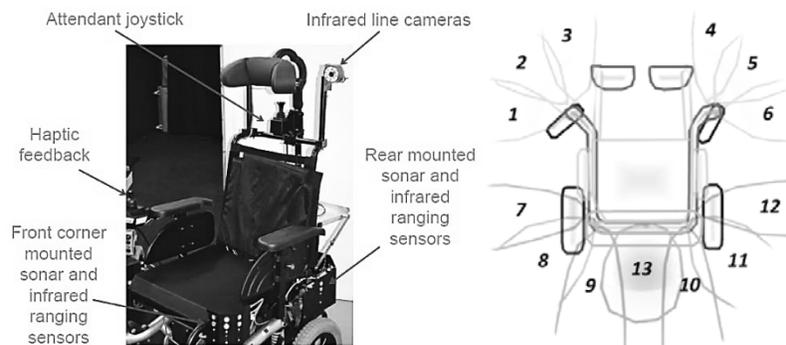


Figura 5 Entradas/ salidas y límites de detección del proyecto SYSIASS

2.2 Sillas de ruedas con interacción hombre robot

El proyecto LIASD-Wheelchair por Laboratoire d'Informatique Avancée de Saint-Denis en la Universidad de París, propone un método de interacción háptica empleando retroalimentación por fuerza en el joystick empleando una red de sensores LIDAR como se muestra en la Figura 6, [25], también tiene sus precedentes en control joystick háptico en [26].

Tiene un control embebido estructurado en 3 niveles: control básico (control de posición, control de velocidad), táctico (seguir trayectoria, generador de referencia, búsqueda de objetivos) y estratégico (administrador de servicios). El proyecto utiliza el concepto de impedancia virtual a través



de un modelo, el cual asegura una transición suave de velocidad para el seguimiento de trayectorias, con lo cual realiza una interacción usuario-robot.



Figura 6 Prototipo LIASD

El proyecto LURCH del laboratorio de Inteligencia artificial y robótica en el departamento de electrónica, informática y bioingeniería del Politécnico de Milano [27] y [28], propone un control multimodal a través de un joystick clásico, pantalla táctil, interface miográfica e interface cerebro computadora en orden de crear un sistema semiautónomo para rango amplio de usuarios con discapacidad motora como se muestra en la Figura 7. El usuario tiene la oportunidad de escoger entre 3 niveles de autonomía que abarcan desde evasión de obstáculos hasta autonomía completa.

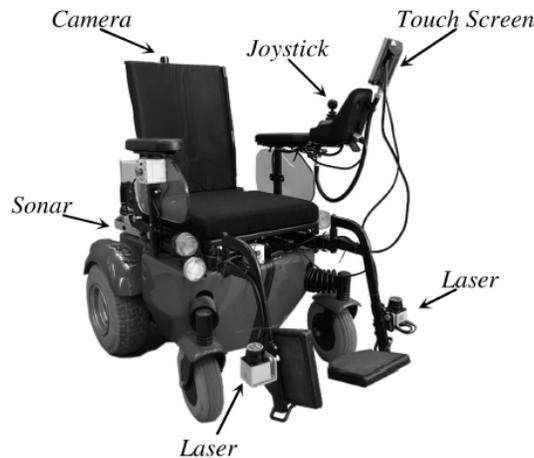


Figura 7 Proyecto LURCH

Los sensores, electrónica y un equipo de cómputo son agregados a una EPW comercial; el sistema de control inteligente cuenta con una interface que simula la señal del joystick original. El diseño de la silla contiene 3 módulos:

Localización: emplea un sistema de visión por computadora apuntando hacia techo de una casa y marcadores pasivos para que la IWs pueda determinar en qué habitación se encuentra, como se muestra en la Figura 8.

Planeación: emplea un algoritmo A* modificado para la aplicación en espacios de 2D.

Control. Emplea 2 juegos de reglas difusas de orientación y detección de obstáculos, las cuales son habilitadas solo cuando navegación autónoma es requerida por el usuario.

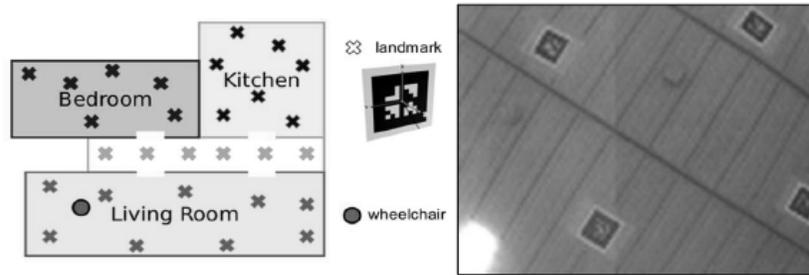


Figura 8 Marcadores Pasivos

El proyecto LURCH aún está activo y sugiere considerar el uso del ISO 13482 para la interacción hombre robot.

2.3 Sillas de ruedas inteligentes con interface en cómputo móvil

La adición de dispositivos móviles y las IWs hacen posible tomar ventaja de SMS, E-mail, pantallas táctiles, VR y sensores del celular para interactuar con el usuario.

El proyecto PUNE-IWs del colegio de ingeniería e investigación de Dnyanganga en India consiste una silla de ruedas inteligente con sensores de obstáculos, temperatura, gas y vinculación con un teléfono inteligente a través de Bluetooth para lograr un poco de movimiento independiente [29].

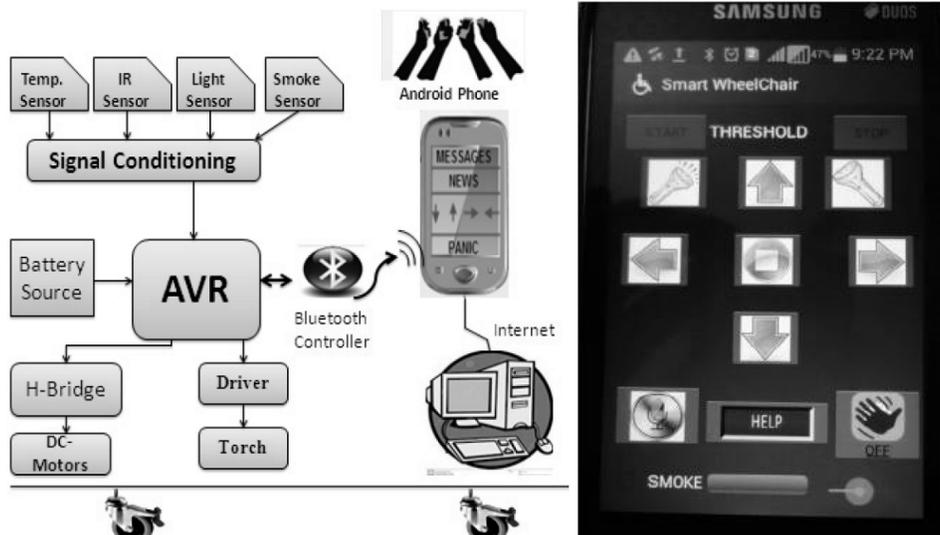


Figura 9 Diagrama a bloques e interface del proyecto Pune-IWs

La Figura 9, muestra los sensores que emplea el proyecto para detectar obstáculos, en adición emplea sensores de temperatura, gas y un botón de emergencia. La App de control es diseñada

para el SO Android, el diseño de la interfaz permite el uso de reconocimiento de voz, pantalla táctil y el uso de acelerómetro.

3. Diseño de la interfaz de control

Las IWs citadas comparten el uso de sensores para poder determinar la presencia de un obstáculo a través de una diversa gama de sensores, desde ultrasónicos, láser y cámaras con visión por computadora que son microcontrolados, es a través de la experiencia del usuario en que este se adapta al sistema en cuanto a la velocidad máxima que puede alcanzar o distancia mínima antes de chocar con un obstáculo, pero si los rangos de detección o velocidad no se adaptan también al usuario conforme a su experiencia, esto supondrá una barrera en su interacción con el robot.

Otra característica que comparten son las directivas de control limitadas independientemente de la multimodalidad de la IWs, por lo que para dar mayor autonomía se apoyan en algoritmos propios de visión por computadora, localización simultánea, mapeo y búsqueda, sin embargo una reconfiguración manual por parte del usuario de algún parámetro resulta difícil de implementar pues los sistemas se ocupan del control de dirección o destino de la IWs, por ello el sistema se debe de adaptar al usuario.

3.1 Determinación de la resolución mínima necesaria para el control de dirección

Los movimientos que realizar el robot son 5: alto, adelante, atrás, izquierda y derecha. La entrada de información por parte del usuario es una ligera inclinación de la cabeza inclinación de la cabeza como muestra la Figura 10. El proceso de detección devuelve una respuesta a 5 bits para identificar la entrada por parte del usuario, de esta forma el sistema es combinatorial. Si se requiere ejecutar más movimientos o tener otras opciones para el control del robot, entonces el sistema sería secuencial debido a que no se pueden hacer combinaciones entre las entradas del usuario todas a la vez.



Fig. 10 Inclinación de rostro como método de control del robot

3.2 Determinación del ángulo de inclinación

La dirección y velocidad propuesta por una silla EPW es proporcional a la inclinación del joystick, sin embargo para una persona con deficiencia de movimiento en sus extremidades no es posible emplear este método de entrada. La inclinación del rostro para el control del robot permite usar la cabeza como un joystick, el dispositivo sensor un acelerómetro de 3 ejes de un teléfono inteligente debido a que es un hardware común entre usuarios con EPW. La colocación de juega un papel importante en la detección, por lo que se adecuó una base que lo sitúa al costado izquierdo del usuario junto a la oreja, la relación de ángulo de inclinación y movimiento se muestra en la Tabla 3.



Tabla 3 Relación inclinación y acción del robot

Eje x	Eje y	Eje z	Acción
$-5 < x < 5$	DC	$-5 < x < 5$	Alto
$-5 < x < 5$	DC	$-10 < x < -5$	Izquierda
$-5 < x < -15$	DC	$-5 < x < 5$	Adelante
$-5 < x < 5$	DC	$5 < x < 10$	Derecha
$5 < x < 15$	DC	$-5 < x < 5$	Atrás

3.3 Sistema difuso para el control de velocidad en base a la experiencia del usuario

La determinación de la velocidad propuesta es calculada mediante un sistema difuso [30] cuyas variables de estado son la experiencia del usuario y la distancia a un obstáculo, de esta forma si el usuario tiene poca experiencia podrá moverse con menor velocidad, mientras que si tiene una mayor experiencia le permitirá moverse con mayor velocidad. Las variables de estado tienen 5 etiquetas lingüísticas: muy lejano (ML), lejano (L), normal (N), cerca (C) y muy cerca (MC), la Figura 11 muestra la relación de las etiquetas lingüísticas y la distancia en decímetros con respecto a un obstáculo detectado por el sensor ultrasónico. La Figura 12 muestra la relación de las etiquetas lingüísticas y la experiencia del usuario, la cual es valorada de 0 a 100% y es obtenida a través de un cuestionario con información relativa al control de las EPW y libertad de movimiento del cuello.

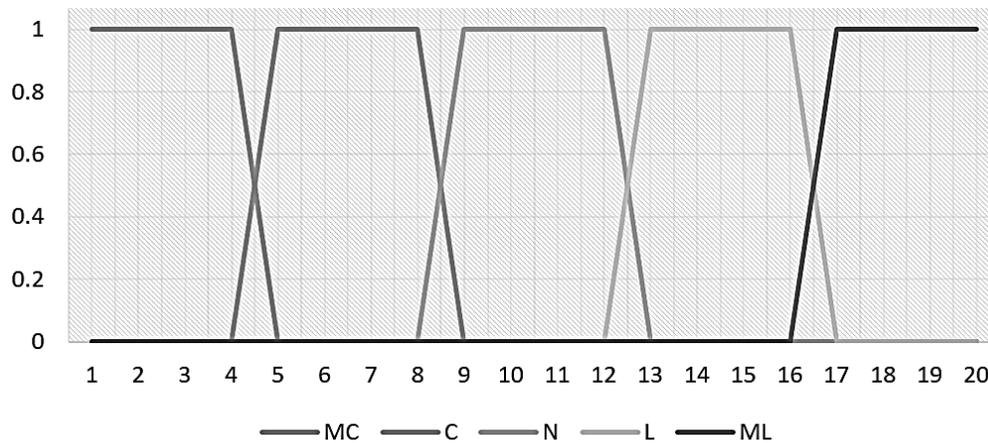


Fig. 11 Variable de estado distancia de choque en decímetros

Las variables a controlar son la distancia mínima de choque y la velocidad máxima, debido a que un usuario inexperto al acercarse a un objeto debe de mantener su distancia para no chocar, mientras que un usuario experimentado debe tener la facultad de poder acercarse aún más pues ha aprendido a interactuar con el hardware. La Figura 13 muestra la relación de las etiquetas lingüísticas con la velocidad cuyo límite es 10 km/h, debido a que es la velocidad máxima del robot, las etiquetas son: velocidad muy baja (VMB), velocidad baja (VB), velocidad normal (VN), velocidad alta (VA) y velocidad muy alta (VMA). El estándar ISO-13482 indica que todo dispositivo robótico empleado para rehabilitación y cuidado no debe de exceder los 20 km/h [31].

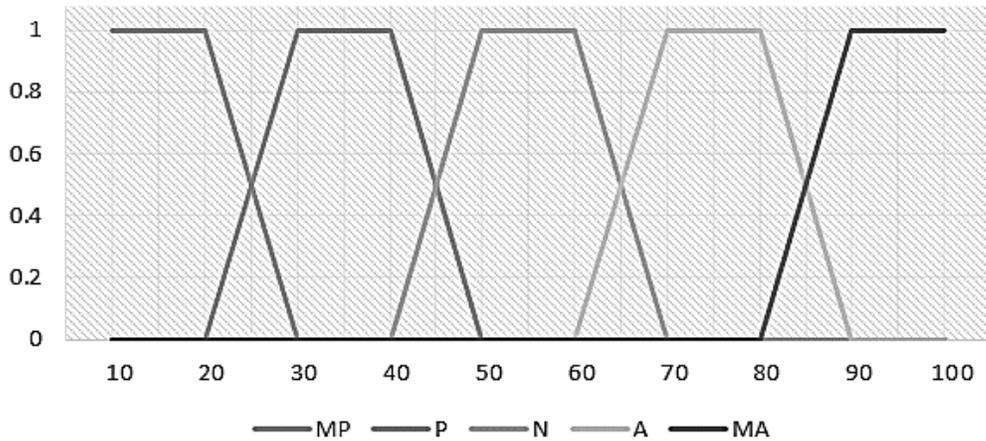


Fig. 12 Variable de estado experiencia del usuario

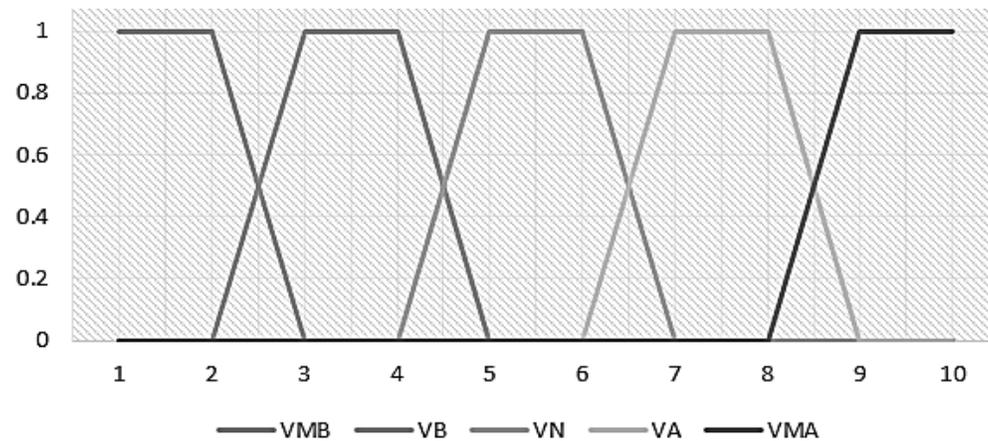


Fig. 13 Variable de control velocidad

3.4 Sistema difuso para el control de distancia de choque mínima

La determinación de la distancia es calculada mediante un sistema difuso cuyas variables son la experiencia del usuario y la distancia a un obstáculo, de esta forma si el usuario tiene poca experiencia podrá detenerse a tiempo, mientras que si tiene una mayor experiencia le permitirá acercarse más a los objetos. Las variables de estado son mostradas en las Figuras 11 y 12, mientras que la Figura 14 muestra la relación de las etiquetas lingüísticas con la distancia mínima, las variables de estado tienen 5 etiquetas lingüísticas: muy lejano (ML), lejano (L), normal (N), cerca (C) y muy cerca (MC).

El conjunto de reglas difusas empleado es mostrado en la Tabla 4, fue obtenido a partir entrevistas con usuarios de sillas de ruedas y el tipo de velocidad que requieren para realizar sus actividades. La Tabla 5 muestra las reglas difusas para determinar la distancia mínima de alto y la retroalimentación auditiva por medio de módulos texto a voz en el dispositivo móvil.

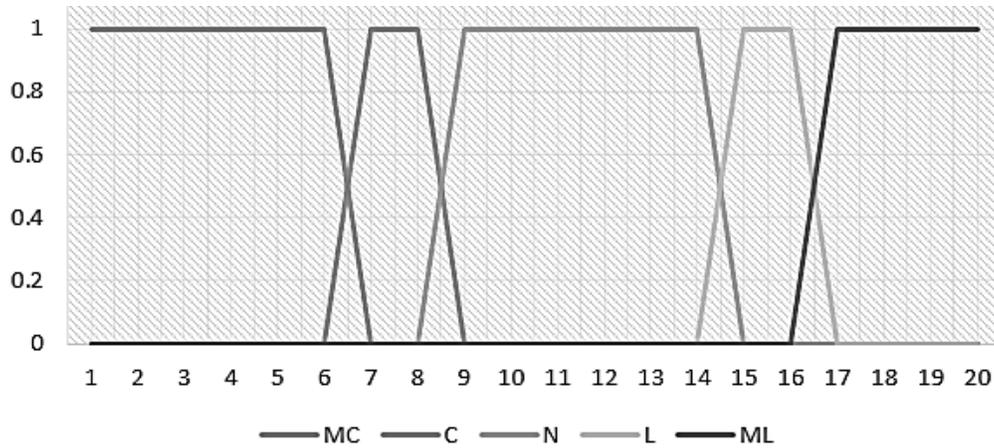


Fig. 14 Variable de control distancia mínima

Tabla 3 Reglas difusas para la velocidad máxima

Distancia	Experiencia				
	MB	B	N	A	MA
MC	VMB	VMB	VMB	VB	VB
C	VMB	VB	VB	VB	VN
N	VB	VB	VN	VN	VN
L	VN	VN	VA	VA	VA
ML	VN	VA	VMA	VMA	VMA

Tabla 4 Reglas difusas para determinar la distancia mínima

Distancia	Experiencia				
	MB	B	N	A	MA
MC	MC	MC	MC	C	C
C	MC	C	C	C	N
N	C	C	N	N	N
L	C	N	L	L	L
ML	N	N	ML	ML	ML

3.5 Diseño del sistema de interface entre el celular y el hardware

La Figura 15 muestra el diagrama a bloques del hardware del robot, el cual consta de un módulo de Bluetooth serial para la interface entre el hardware y la aplicación en el Smartphone. Un módulo IOIO que media la comunicación entre los sensores, Bluetooth y el puente H; el dispositivo IOIO recibe la señal por parte de la tarjeta de adquisición de datos en forma serial, por lo que la actualización de la información se realiza a razón de 20 milisegundos por sensor ultrasónico, un ciclo completo es de 100 milisegundos más 1 milisegundo por cada paquete, por lo que la frecuencia de actualización es de 9.6 veces por segundo.

La tarjeta TREX permite el control de los motores de 5 amperios del robot mediante un PWM programable vía protocolo serial [32]. La señal serial proviene de la aplicación del smartphone a través de los módulos bluetooth y la tarjeta IOIO. La tarjeta de adquisición de datos recaba la



información de los sensores, se empleó la tarjeta Arduino Mega, por ello el tiempo de adquisición lo realiza secuencialmente.

4. Resultados

La aplicación identifica la inclinación del rostro del usuario respetando los límites establecidos, además retroalimenta por texto a voz la elección tomada. La figura 16 muestra la interface creada y la adaptación del dispositivo móvil al rostro del usuario. El tiempo de respuesta del sistema al momento de tomar una decisión varía entre 120 ms y 131 ms, debido al tiempo de comunicación, adquisición de datos de los sensores y uso de protocolos seriales. El hardware implementado se muestra en la Figura 17.

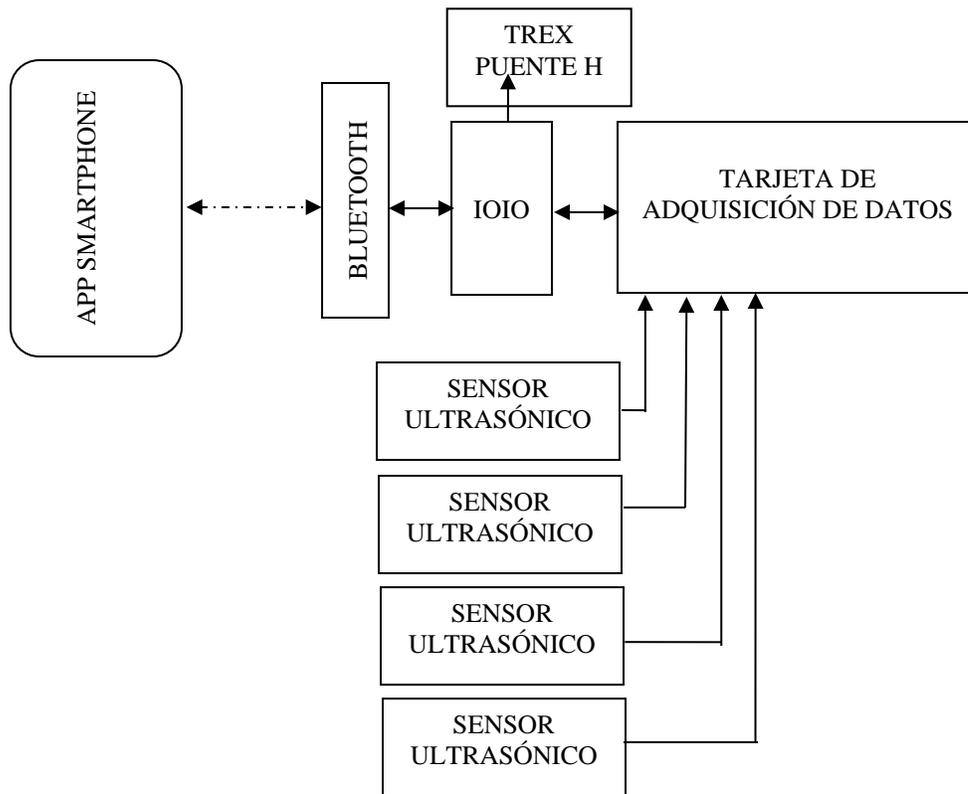


Fig. 15 Diagrama a bloques del hardware del robot

Se probó la aplicación en diversos Smartphone obteniendo una frecuencia en el ciclo de detección y control que varía entre 8.3 y 7.6 veces por segundo, debido a que los motores requieren un tiempo de arrancado y variación de velocidad además que el cambio de dirección propuesta no es constante el periodo obtenido es aceptable. Los requerimientos de la aplicación son 12 KB disponibles para memoria de datos y el espacio del programa en 3.52 MB.

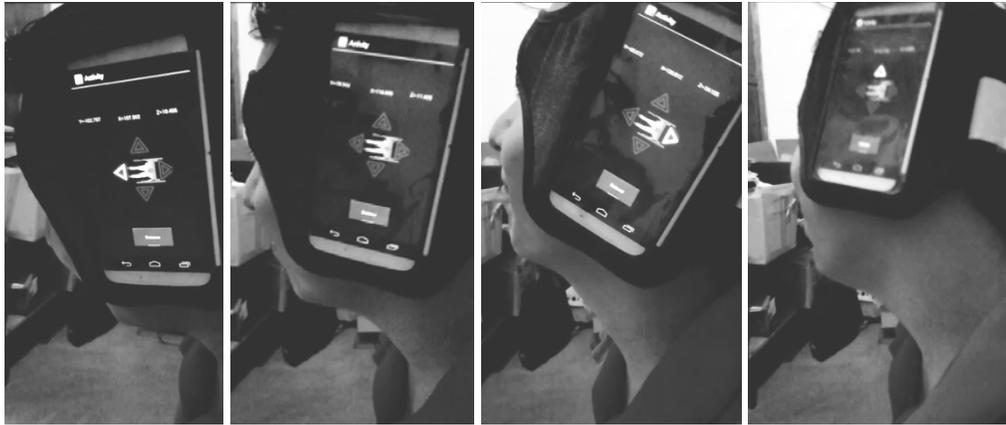


Fig. 16 Usuario empleando control por inclinación con un Smartphone Android

Tabla 5 Tiempo de adquisición y control del robot

Modelo	Microprocesador	Memoria	Tiempo
Galaxy S5	2.5 Ghz	2G	120 ms
Moto G	1.2 Ghz	1G	131 ms
Galaxy A5	1.2 Ghz	2G	125 ms
HTC ONE	1.5 Ghz	1G	123 ms

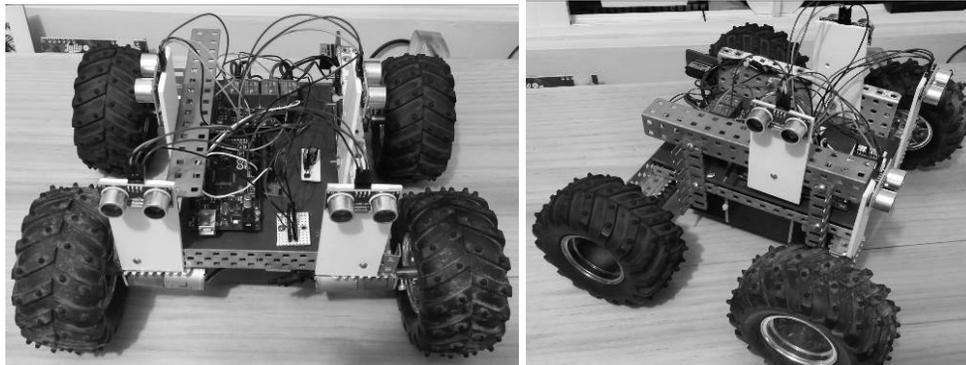


Fig. 17 Hardware implementado

5. Conclusiones

El control implementado con cómputo móvil ofrece otras ventajas a comparación con el computo tradicional: circuitos de recarga de batería más económicos; mayor tiempo de autonomía;; uso de los sensores integrados del celular permiten medir la velocidad, aceleración, presencia entre otras variables sin aumentar el costo de una IWs. El método de adquirir la dirección propuesta mediante la inclinación del rostro permite que usuarios puedan controlar un robot móvil con menor esfuerzo comparado al joystick. La determinación de la distancia mínima de choque y velocidad máxima, permite modificar las variables de control de un robot móvil, haciendo que esta se adapte al usuario y mejore su interacción hombre robot.



Referencias

- [1] Harold Soh, Y. D. "Learning Assistance by Demonstration: Smart Mobility". *Journal of Human-Robot Interaction*, 76-100, 2015.
- [2] R. S. Rao, K. C. "Human Robot Interaction: Application to Smart Wheelchairs". *Proceedings of the 2002 IEEE*, 3583-3588, 2002.
- [3] Rory A. Cooper, H. O. "An introduction to rehabilitation engineering". Pennsylvania: Taylor & Francis Group, 2007.
- [4] Damian Gordon, C. O. "Teaching Universal Design in computer science". *Universal Design in Education Conference 1*, 2015.
- [5] Maisel, E. S. "Universal Design: Creating Inclusive Environments". New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2012.
- [6] Smith, W. P. "Universal Design Handbook, 2nd Edition 2". New York: McGraw Hill Professional, 2010.
- [7] Página Web de National Disability Authority, Universal Design. "Centre for Excellence in Universal Design". Obtenido de: <http://www.universaldesign.ie/>
- [8] Sanford, J. A.. "Design for the ages: Universal design as a rehabilitation strategy". Georgia: Springer Publishing Company, 2012.
- [9] Gaudino EA, M. L.. "Development of the Functional Assessment Taxonomy". Washinton: US National Library of Medicine, 2001.
- [10] INEGI, "Censo General de población y Vivienda 2010". Ciudad de México: INEGI, 2010.
- [11] Bouck, E. C. "Assistive Technology". Singapore: SAGE, 2016.
- [12] Sante, O. M., Organisation mondiale de la santé. Obtenido de "Technologies d'assistance", obtenido de: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/assistive-technology/fr/>
- [13] Rodrigo A. M. Braga, M. P., "Concept and Design of the Intellwheels Platform for Developing Intelligent Wheelchairs". En J. A. Cetto, *Informatics in Control, Automation and Robotics* (págs. 191-203). Portugal: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [14] M. R. Petry et al, "IntellWheels: Intelligent wheelchair with user-centered design". *e-Health Networking, Applications & Services (Healthcom)*, 414-418, 2013.
- [15] A. Ruíz-Serrano et al, "Development of a dual control system applied to a smart wheelchair, using magnetic and speech control.". *Procedia Technology: 3rd Iberoamerican Conference on Electronics Engineering and Computer Science, CIECC 2013*, 158-165, 2013.
- [16] Amberlay Ruíz-Serrano et al, "Obstacle Avoidance Embedded System for a Smart Wheelchair with a Multimodal Navigation Interface". *Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, 2014 11th International Conference on, 1-6, 2014.
- [17] Rosalie H Wang, A. M., "Usability testing of multimodal feedback interface and simulated collision-avoidance power wheelchair for long-term care home residents with cognitive impairments". *The Journal of Rehabilitation Research and Development*, 801-821, 2011.
- [18] Rosalie H Wang, T.-V. H., "Evaluation of an intelligent wheelchair system for older adults with cognitive impairments". *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2013.
- [19] Rosalie H. Wang, P. V., "A Wizard-of-Oz Intelligent Wheelchair Study with Cognitively-Impaired Older Adults: Attitudes toward User Control". *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Workshop on Assistive Robotics for Individuals with Disabilities: HRI Issues and Beyond*. Chicago, Illinois, USA: IEEE Xplore, 2014.
- [20] Dawson D.R., C. R., "Development of the power-mobility indoor driving assessment for residents of long term care facilities". *Canadian Journal of Occupational Therapy*, 269-276, 1994.
- [21] J. C. Garcia, M. M., "Intelligent Wheelchairs: Filling the Gap between Labs and People". *Technology: From Research to Practice: AAATE 2013 vol. 33*, pág. 202, 2013.
- [22] Jicheng FU, E. M., US Patente nº US 2016/0143593 A1, 20165.
- [23] Stephen William Kelly, M. H., "Powered Wheelchair Platform Assistive Technology Deveelopment". *Fifth International Conference on Emerging Security Technologies (EST)* (págs. 52-56). Alcala de Henares, España: IEEE Xplore Digital Library, 2014.
- [24] Rodrigo A. M. Braga, M. P., "Concept and Design of the Intellwheels Platform for Developing Intelligent Wheelchairs". En J. A. Cetto, *Informatics in Control, Automation and Robotics* (págs. 191-203). Portugal: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.



- [25] Youcef Touati et al, "Smart Powered Wheelchair Platform Design and control for People with Severe Disabilities", Software Engineering 2012, 49-56, 2012.
- [26] G. Bourhis, M. S., "Assisted Control Mode for a Smart Wheelchair". Proceedings of the 2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics, (págs. 158-163). Noordwijk, The Netherlands: IEEE Xplore, 2007.
- [27] Bonarini, A. C., "Introducing LURCH: A shared autonomy robotic wheelchair with multimodal interfaces". Proceedings of IROS 2012 Workshop on Progress, Challenges and Future Perspectives in Navigation and Manipulation Assistance for Robotic Wheelchairs, 2012.
- [28] Gu, P., AIRLab. Obtenido de "LURCH - The autonomous wheelchair": <http://airwiki.ws.dei.polimi.it/index.php/Lurch>
- [29] Shraddha Uddhav khadilkar, N. W., "Android phone controlled Voice , Gesture and Touch screen operated Smart Wheelchair". International Conference on Pervasive Computing (ICPC). Pune, India: IEEE Xplore, 2015.
- [30] Wolfgang Ertel, "Introduction to Artificial intelligence", Springer Verlag London Limited, 2011.
- [31] ISO-13482:2014, "Robots and robotics devices-Safety requirements for personal care robots", International Organization for Standardization, 2014.
- [32] Pololu, "Pololu Trex User's Guide", Hoja de datos, 2015.



Desarrollo de un prototipo para impresión de biomateriales en 3D

Domingo Rangel Miranda^{1*}, Rafael Guerra Aranda², Mario Ramos Montes³, Miriam Rocío Estévez González¹

¹Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla Querétaro, Qro., C.P. 76230, México.

²Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Querétaro, Av. Tecnológico s/n Colonia Centro, Santiago de Querétaro, Qro., C.P. 76000, México.

³Universidad Tecnológica de Querétaro, Av. Pie de la Cuesta 2501, Col. Unidad Nacional, C.P. 76148, Santiago de Querétaro, Qro., México.

*Autor para correspondencia.

E-mail: ranged@fata.unam.mx (D. Rangel).

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño de un prototipo automatizado de impresión de biomateriales poliméricos utilizado para la fabricación de andamios de crecimiento celular de tejidos biológicos. Este sistema consiste de una mesa de ejes coordenados X, Y, Z, los cuales son controlados por motores a pasos para posicionar las coordenadas de la pieza del andamio a imprimir. El biomaterial de impresión es extruido por un motor a pasos y un calefactor a una temperatura de 220°C. El diseño del andamio es realizado en Matlab y los datos son cargados en una memoria SD la cual, exteriormente se comunica con un microcontrolador en modo maestro que distribuye las tareas a microcontroladores esclavos para controlar el posicionamiento de los ejes. Las formas y estructura de impresión de los andamios son de naturaleza compleja ya que deben tener estructuras con ángulos agudos hasta de 5° de modo radial y axial, mismas que sirven para crecimiento celular en tejidos biológicos como el del menisco humano. Este sistema de impresión es acoplado a un sistema de electrotejido (electrospinning) para que los andamios sean cubiertos con capas de biofibras nanométricas y tengan un módulo de elasticidad compatible con la función biomecánica a realizar por el tejido sintético. Se presentan resultados de la impresión de andamios hechos de biomaterial PLA (ácido poliláctico) fabricados con este prototipo automatizado, los cual nos indica que es factible construir biomateriales sustitutos de tejido biológico, como un menisco sintético mediante impresión tridimensional automatizada de biomateriales.

Palabras clave: Impresión, Biomateriales, Andamios, Tejidos, Prototipo.

1. Introducción

La rodilla es la articulación que más impacto recibe en el cuerpo. Su función principal consiste en ser el soporte de todo nuestro cuerpo, siendo el menisco el principal centro de amortiguación de impactos y distribución de carga. Sin embargo, debido a su complejidad y patologías no existe una regeneración o sustitución adecuada de este elemento tan importante, existiendo aun varias técnicas para su reparación [1]. Además existen varios aspectos que hace especialmente difícil la fabricación del menisco en Ingeniería de Tejidos para su reemplazo como son los aspectos de anisotropía, vascularización, porosidad, etc. que tienen a su vez comportamientos no lineales y no es posible fabricarlos con técnicas convencionales [2]. Con las nuevas técnicas de impresión de biomateriales en Ingeniería de Tejidos se pueden, además de atender características de morfología y propiedades



biomecánicas, condiciones estructurales para formar andamios de menisco y considerar factores de crecimiento, modelos para animales y factores socioculturales [3]. Se han hecho intentos para la construcción de tejido fibroso basadas en multicapas de micro y nanofibras de colágeno alineadas, con macroporos de ácido poliláctico. Esta aplicación ha tenido buenos resultados en matrices de crecimiento extracelular [4]. No obstante para reproducir la morfología compleja del menisco, se han fabricado andamios por medio de la técnica de electrospinning, mezclando varios polímeros biocompatibles y colágeno, además de componentes de una matriz extracelular, dando muy buenos resultados en relación a la morfología, comportamiento biomecánico y pruebas de vascularización [5]. Por ello es que se propone realizar un sistema mecatrónico de impresión de biomateriales compatibles en forma tridimensional.

2. Desarrollo del prototipo

2.1 Diseño y construcción de los subsistemas.

Se estudió la cinemática de la impresión tridimensional de biomateriales, los cuales serán colectados en electrodos con morfología prediseñada, así como la forma en que se harán capas de biomaterial hasta alcanzar el volumen adecuado según las dimensiones requeridas por el tejido a reemplazar.

Se propusieron los elementos mecatrónicos que permitan el control de movimiento en los ejes X, Y, Z, tales como motores a pasos, transmisiones con flechas sinfin, elementos de tracción, acoplamientos con rodamientos, guías lisas y elementos de fin de carrera durante la impresión, como se observa en la figura 1, analizando el comportamiento no lineal de los materiales que componen el menisco en una articulación natural, debido a su densidad, porosidad y modulo elástico. Se utilizaron 2 motores a pasos (SM 42BYG011-25) por eje coordinado.

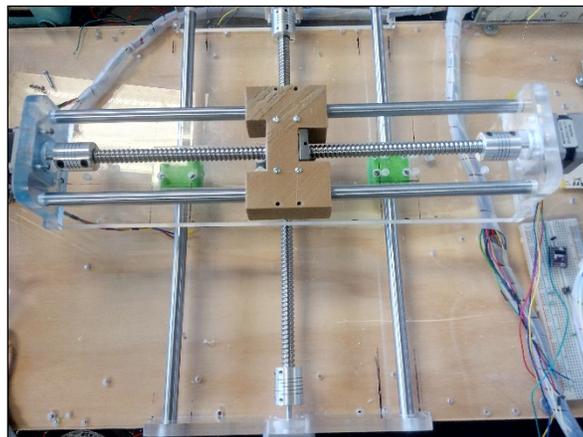


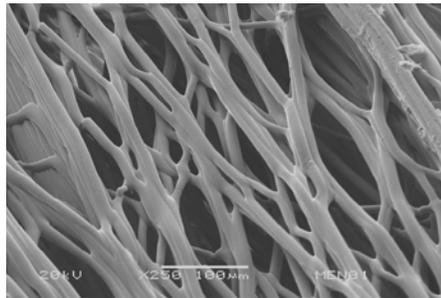
Figura 1. Elementos mecánicos para guiar el movimiento en los ejes X y Y.

Se diseñaron y construyeron los sistemas electrónicos de control y de potencia para mover de manera controlada y precisa cada movimiento de la impresión. Se aplicaron diferentes algoritmos de control de posición, velocidad y aceleración para verificar y adecuar el rendimiento que tiene cada uno de éstos en el movimiento complejo de fabricación del menisco.

La programación de los dispositivos electrónicos de control, posición y velocidad de los elementos móviles del sistema se realizó en un microcontrolador PIC4550, conformando arreglos programados maestro-esclavo, para cada uno de los ejes coordinados.



Se diseñó y construyó así mismo un tercer eje para realizar movimiento en Z, esto para llevar a cabo la impresión de los biomateriales en forma tridimensional. Es importante señalar que la impresión tridimensional llevada a cabo para formar tejidos biológicos es compleja debido a parámetros como la densidad de biofibras por unidad de volumen, la alineación de las fibras en el andamio así como la conformación estructural de las mismas para la elasticidad del tejido y el módulo de compresión, pues estas variables incidirán en su comportamiento biomecánico y en la función que estén realizando. Para el caso de un menisco es importante observar cómo es la conformación de las estructuras complejas tanto en sentido axial como en el sentido longitudinal, dependiendo la zona en la que esté soportando el peso o la fuerza de compresión. En la figura 2 se muestra la estructura general de un menisco, donde se muestran las zonas de incidencia mecánica, dando lugar a microestructuras complejas [5], como la observada en la imagen de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y que son necesarias para que puedan imprimirse el biomaterial en cuestión.



El tamaño de poro reportado para meniscos en la parte externa está entre 50–100 micras, que es el mismo que se puede observar en la imagen de SEM del material obtenido.

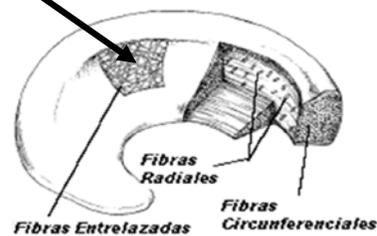


Figura 2. Conformación de la estructura de micrométrica de andamio de un menisco sustituto.

Por otro lado se integró la instrumentación electrónica para el control de la temperatura de extrusión de los distintos biomateriales, tales como policaprolactona, ácido poliláctico y colágeno, cuya temperatura de fusión va desde 40° a 300°C, con un controlador Autonics TC4S que tiene programado un controlador PID con autosintonía y el sensor temperatura es tipo termistor NTC. Se seleccionaron los sensores de temperatura para tener un control muy preciso de $\pm 1^\circ\text{C}$, así mismo se buscó aplicar algoritmos para adecuar en conjunto la temperatura de extrusión, la velocidad de impresión y posición del punto a imprimir. Se seleccionarán las boquillas de extrusión para tener resolución de impresión entre 0.1-0.4 mm necesaria para la impresión de estructuras de crecimiento celular con ángulos agudos hasta de 5°. En la figura 3 se observa el extrusor con la boquilla de impresión del biomaterial con un ventilador de enfriamiento.

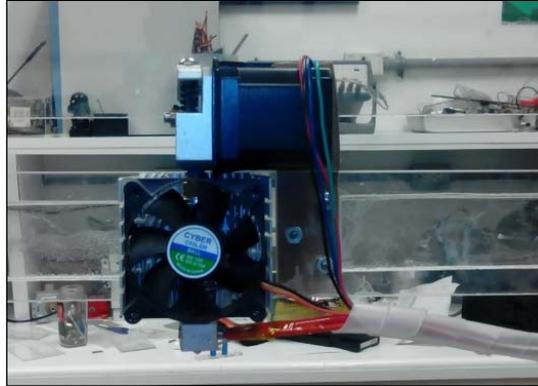


Figura 3. Sistema de extrusión térmica del biomaterial.

El sistema completo se ensambló de tal manera que tengamos 3 ejes coordinados con una carrera o longitud de ejes en X de 20 cm, en Y de 25 cm y en Z de 15 cm, así como extrusor en forma vertical para que una vez conseguida la temperatura de extrusión, el biomaterial, que es preparado especialmente pueda ser extruido desde la parte superior, se deposite punto a punto en la placa colectora. Las velocidades lineales alcanzadas por este prototipo en los tres ejes van desde 0.5 mm/seg hasta 2 mm/seg, las cuales se definieron para adecuar la resolución de impresión que permite la boquilla, con la velocidad de impresión. Interruptores de fin de carrera se pusieron para delimitar la longitud máxima de impresión. En la figura 4 se muestra el sistema completo con la sección de electrotejido donde se observa el rodillo de enrollamiento de biofibras y la placa colectora para enrollar biofibra en forma planar.



Figura 4. Sistema de impresión de biomateriales 3D con acoplamiento de electrotejido.

El acoplamiento de un sistema de electrospinning fue de gran utilidad para aglomerar biofibras en forma volumétrica, donde es posible controlar la densidad de biofibras por unidad de volumen, la alineación de las biofibras y porosidad para el crecimiento celular, así como para inducir la vascularización.

El diseño de un elemento a ser sustituto de tejido humano se lleva a cabo en Matlab, donde se construyen formas regulares de andamios para ser fabricados en forma tridimensional y luego son procesadas por el sistema de electrospinning para ser creados voluméticamente. Un ejemplo de forma de andamio diseñado en Matlab es mostrado en la figura 5.

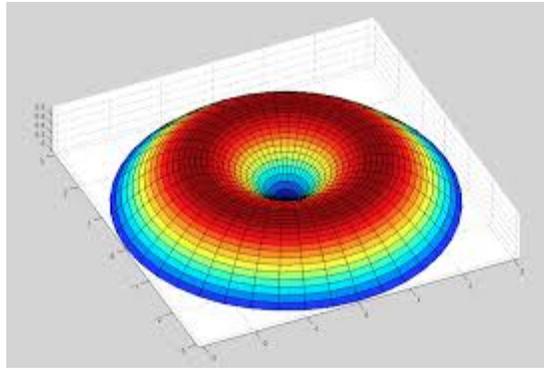


Figura 5. Forma volumétrica de un andamio base para crecimiento celular.

3. Resultados

Debido a que los polímeros ofrecen grandes ventajas para ser implantados en el cuerpo humano por el hecho de que pueden fabricarse en formas muy distintas tales como fibras, tejidos, películas y bloques de diferentes tamaños, se propuso el uso de biofibras de un copolímero poliuretano- poliácido láctico-policaprolactona-colágeno, que presente resistencia química, mecánica, biocompatibilidad y no tóxico para ser probado como sustituto de cartílago y menisco de rodilla. Es necesario que el material sea biocompatible, que posea flexibilidad y morfología semejantes al tejido del menisco, además de resistencia al desgaste mecánico. Para ello es importante que el sistema pueda tener control sobre el depósito del biopolímero, es decir que pueda construir tridimensionalmente cada punto de impresión pues debe soportar esfuerzos mecánicos de gran magnitud hasta de 50 kg/cm^2 . Debe ser suficientemente flexible para amortiguar el peso de una persona y distribuir esfuerzos hacia la tibia en el caso del menisco de rodilla. Un andamio de menisco fue construido de forma tridimensional (figura 6 derecha) tomando como modelo un menisco idealizado en Solid Works™ visto en la parte izquierda de la figura 6.

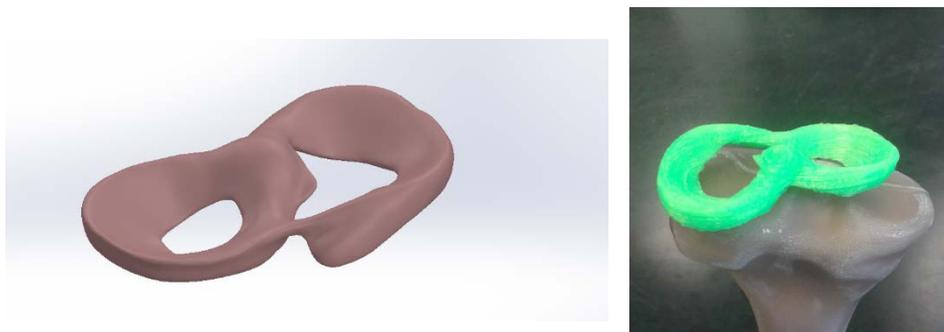


Figura 6. Menisco modelo y construido en forma tridimensional.

Así mismo se pudieron construir estructuras con biofibras nanométricas alineadas y entrelazadas, como se observan las imágenes de Microscopía Electrónica mostradas en la figura 7., que como se comentó anteriormente deben cumplir funciones específicas, por ejemplo en el menisco sustituto. Se lograron realizar pruebas mecánicas y probar que el acomodo de las biofibras en estas estructuras tiene buena resistencia mecánica y favorece la vascularización en el tejido sustituto de menisco [5].

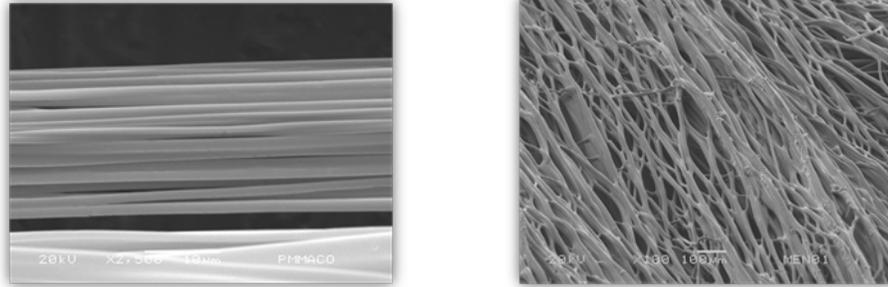


Figura 7. Estructuras obtenidas por electrospinning.

Una vez que se pudo imprimir el biomaterial tanto de forma tridimensional, así como agregar biofibras se conformó un primer menisco completo base, en donde se muestra ya la forma, además de su prueba mecánica correspondiente [6].

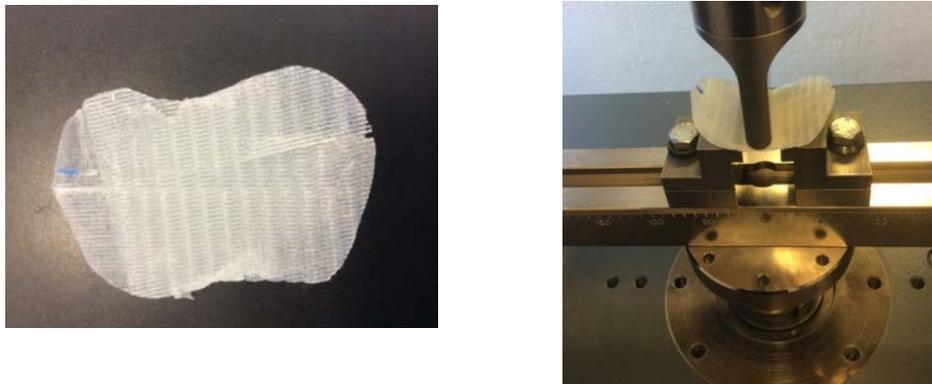


Figura 8. Andamio de menisco base y su prueba mecánica de compresión.

A los primeros andamios obtenidos se les hicieron pruebas de compatibilidad citotóxica para ver su rechazo por tejido vivo en ratas, de vascularización, pruebas mecánicas, obteniendo buenos resultados.

4. Conclusiones

Se logró el desarrollo de un prototipo de impresión de biomateriales basado en un sistema de ejes coordenados X, Y y Z para conformar andamios que sirvan como matriz de crecimiento extracelular. Se propusieron los elementos tanto del sistema mecánico así como los algoritmos de impresión embebidos en microcontrolador, en configuración maestro-esclavo para imprimir tridimensionalmente los andamios y crecerlos volumétricamente con el sistema de electrospinning trabajando de manera simultánea. Con este sistema se logró una resolución en la impresión de 0.1 a 0.4 μm , lo que hace factible poder generar formas agudas hasta de 5° necesarias para la proliferación de la vascularización, una vez que el tejido fabricado es implantado. Se logró instrumentar un sistema de control de temperatura hasta de 300°C con un error de $\pm 1^\circ\text{C}$ en estado estable para la extrusión de los biomateriales, el cual se sincronizó con un motor a pasos para ir depositando el material en los puntos indicados por el diseño en matlab del tejido sustituto. Dichos andamios fueron intentados para reproducir un biomaterial sustituto de menisco. Se lograron crear andamios simples con estructuras romboidales alineadas de PLA (ácido poliláctico) hasta de 5° angulares y posteriormente se crecieron volumétricamente mediante electrospinning para semejar el comportamiento y funcionalidad biomecánica de un menisco sustituto, el cual presentó, mediante pruebas mecánicas un comportamiento anisotrópico muy similar al menisco natural. Se obtuvo de esta forma finalmente un prototipo experimental de laboratorio el cual permitirá hacer investigación



relacionada con la Ingeniería de Tejidos aplicado por ahora a la fabricación de andamios de menisco, los cuales podrán ser posibles sustitutos de menisco en personas.

Referencias

- [1] Eleftherios A., Pasha H., Kyriacos A., “*The knee meniscus: Structure-function, pathophysiology, current repair techniques, and prospects for regeneration*”, *Biomaterials*, 32, 7411-7431, 2011.
- [2] Elsie S., Nicholas D., Molly M., “*Complexity in biomaterials for tissue engineering*”, *Nature Materials*, 8, 457-47, 2009.
- [3] Mark A. Sweigart, B.S., and Kyriacos A. “*Toward Tissue Engineering of the Knee Meniscus*”, *Tissue Engineering*, 7 (2), 111-129, 2001.
- [4] Gokhan B., Arda B., Aysel Kiziltay, Nesrin H. and Vasif H., “*Construction and in vitro testing of a multilayered, tissue-engineered meniscus*, *Journal of Bioactive and Compatible Polymers*”, 29(3), 235–253, 2014.
- [5] López G., Hernandez A., Cruz M., Ramírez M., Rangel D., Molina G, Luna G., Estevez M., “*Development of meniscus substitutes using a mixture of biocompatible polymers and extra cellular matrix components by electrospinning*”, , *Materials Science and Engineering C*, 61, 893–905, 2016.
- [6] Suárez C. “*Sistema biomecatronico de rodilla automatizado para pruebas de meniscos sintéticos*”, Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado en Ingeniería en Automatización y Sustentabilidad, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Querétaro, 128 p.p., 2016.



Sistema mecatrónico para la rehabilitación y diagnóstico de lesiones de tobillo

Garza Vazquez Cristian Alonso, Charre Ibarra Saida Miriam, Gudiño Lau Jorge,
Altamira Jaso Mauricio, Melgoza Ziga Daniel

Universidad de Colima
Facultad de Ingeniería Electromecánica
Manzanillo, Colima, C.P. 28860

Resumen

En este trabajo se diseña y desarrolla el control y automatización de un robot paralelo de tres grados de libertad aplicado al diagnóstico y rehabilitación de lesiones de tobillo, evitando que las rutinas de rehabilitación únicamente estén evaluadas en base a la experiencia del personal terapeuta. El prototipo cuenta con una interfaz de usuario desarrollada en LabVIEW que permite realizar diagnóstico y definir rutinas de rehabilitación para pacientes con lesión de tobillo, se programa un controlador PID con la finalidad de manipular la posición lineal de cada uno de los ejes del robot, ocasionado así un ángulo de rotación en el tobillo del paciente, brindando la posibilidad de mejorar el estilo y calidad de vida de las personas con lesiones de tobillo.

Palabras clave: Rehabilitación, diagnóstico, flexión, sistema mecatrónico, controlador, adquisición de datos, LabVIEW.

1. Introducción

Entre las lesiones del tendón y el ligamento que se presentan a los médicos, el esguince agudo de tobillo es una de las lesiones musculoesqueléticas más comúnmente encontradas en los atletas y las personas sedentarias. Los esguinces de tobillo resultan en altos costos para la sociedad debido al mayor uso de recursos sanitarios y la ausencia en el trabajo [1].

Un esguince de tobillo (ET) es una distensión, o alargamiento excesivo con o sin rotura de los ligamentos que se relacionan con la articulación del tobillo; se caracteriza por dolor, edema y limitación durante la marcha.

Anualmente, en el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) alrededor de 275,639 personas con ET son tratadas en los servicios de medicina familiar; como parte de su tratamiento requieren varios días de incapacidad para la recuperación de la extremidad lesionada. Esto ocasiona ausentismo laboral lo que conlleva a consecuencias sociales y económicas [2][3].

La rehabilitación, en un sentido general, es el proceso en el cual a través de fisioterapia es posible recuperar las habilidades físicas perdidas debido a un incidente traumático. En la rehabilitación existen 4 niveles de recuperación dependiendo del nivel de actividad que el paciente requiere: pasiva, asistida, activa y resistiva [4].

Pasiva: Aquella donde el paciente no interviene en lo absoluto en la ejecución del movimiento, por lo general el terapeuta realiza todo el esfuerzo.

Activa: Es cuando la persona realiza todo el esfuerzo por sí misma.

Asistida: Es una modalidad intermedia donde se combina el esfuerzo del paciente y del terapeuta.



Resistiva: Aquella en la que se utilizan sistemas mecánicos donde se presenta una fuerza opuesta al movimiento del paciente.

En la actualidad instituciones de servicio médico realizan el diagnóstico y rehabilitación sin la aplicación de tecnologías, por lo que estos procedimientos quedan subjetivos en gran parte a la apreciación del terapeuta, la figura 1 presenta la evaluación médica realizada a un paciente con lesión de tobillo [2].



Figura 1. Diagnóstico y manejo del esguince de tobillo.

Recientemente, se ha despertado el interés en varias universidades, centros de investigación y empresas alrededor del mundo por desarrollar máquinas y dispositivos que ayuden a rehabilitar y fortalecer la parte afectada de una persona (por ejemplo: tobillo, rodilla, cadera, etc.), a absorber el esfuerzo físico y repetitivo de la terapia, y a ofrecer una mayor diversidad de terapias personalizadas con movimientos precisos y seguros. Por ejemplo, un tipo de máquinas utilizadas en las clínicas y hospitales para la rehabilitación pasiva de lesiones en el tobillo son las de movimiento pasivo continuo (MPC), que sirven como auxiliar a los pacientes para realizar movimientos repetitivos [4].

Un reciente revisión sistemática realizado por Zhang resume diversas técnicas de rehabilitación del tobillo asistidas por robot, concluyendo que la mayoría de ellas fueron beneficiosas para la recuperación del tobillo [5]. Por lo que el presente proyecto se diseña con la finalidad de proporcionar asistencia en el diagnóstico y rehabilitación (activa y pasiva) de lesiones de tobillo en la población infantil (6 a 11 años), mediante un robot paralelo de 3 grados de libertad con una interfaz virtual y una rutina divertida que resulte atractiva para los infantes.

2. Desarrollo

2.1 Metodología del prototipo

En la figura 2 se expone la metodología implementada en el prototipo para el diagnóstico y la rehabilitación de tobillo, se cuenta con una computadora y dos tarjetas de adquisición de datos NI PCI 6221, mediante las cuales se realiza la comunicación del software NI LabVIEW con el robot paralelo de 3 grados de libertad.

En el diagrama de flujo del sistema se observan dos momentos de toma de decisión, en el primero se selecciona si la actividad a realizar es para rehabilitación o diagnóstico, y en caso de ser rehabilitación se indica si es del tipo pasiva o activa. En el caso de la actividad diagnóstica se hace uso de un juego para analizar el movimiento angular del tobillo del paciente.

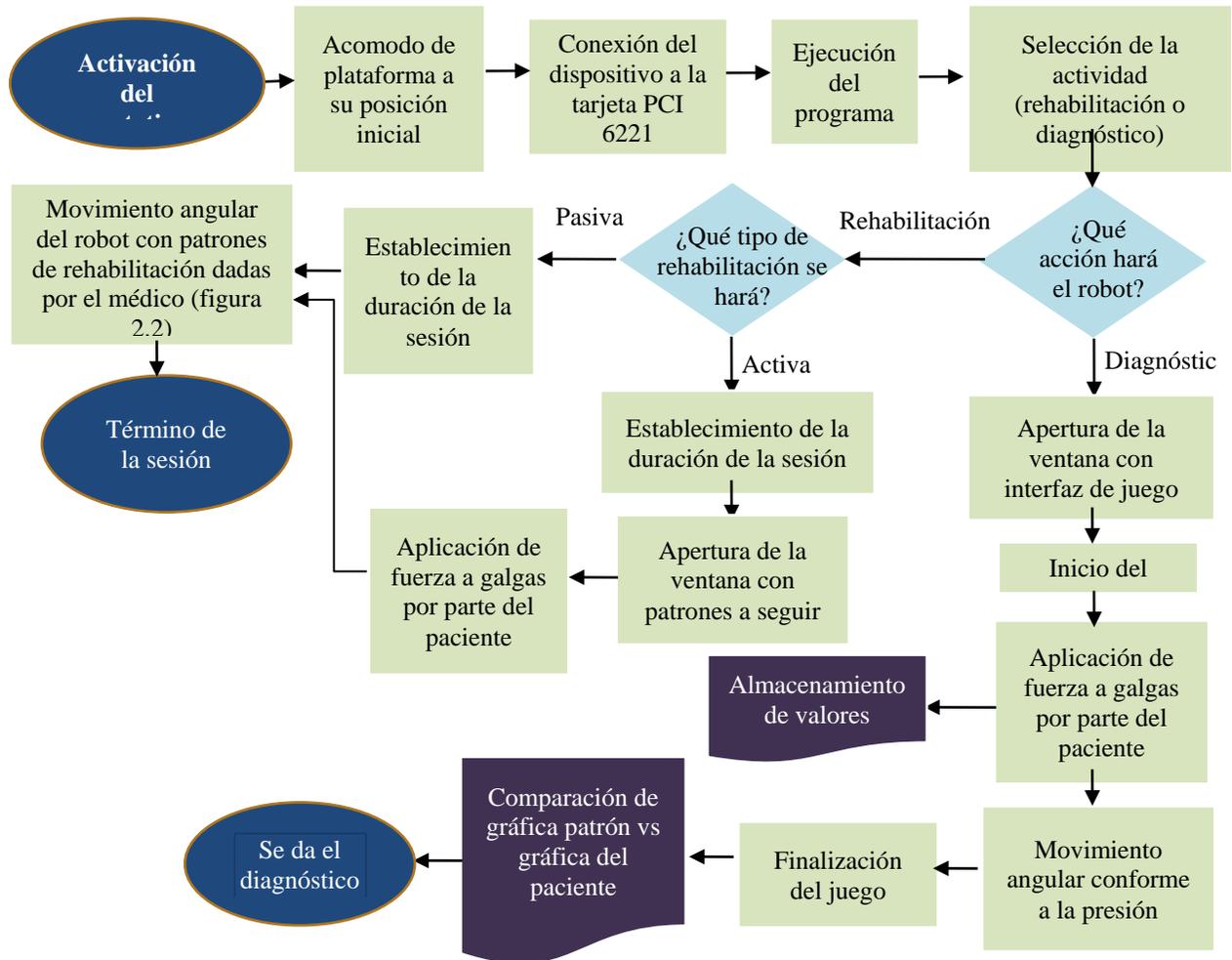


Figura 30. Diagrama de flujo del sistema.

2.2. Tipos de movimiento de tobillo

El tobillo posee tres grados de libertad, cada uno con dos movimientos recíprocos.

- **Dorsiflexión/plantarflexión** (figura 3): La dorsiflexión es el movimiento de la parte superior del tobillo y del pie hacia la parte anterior de la tibia, mientras que la plantarflexión es el movimiento donde el tobillo y el pie se separan de la tibia [6].
- **Eversión/inversión** (figura 4): La eversión es el giro del tobillo y del pie hacia afuera, separándose de la línea media, mientras que en la inversión giran hacia adentro, acercándose a la línea media. El peso recae sobre el borde medial del pie [6].
- **Abducción y aducción** (figura 5): La abducción es el giro del tobillo hacia afuera de la línea media (sin girar el pie), mientras que la aducción es el giro hacia adentro de la línea media (sin girar el pie) [6].

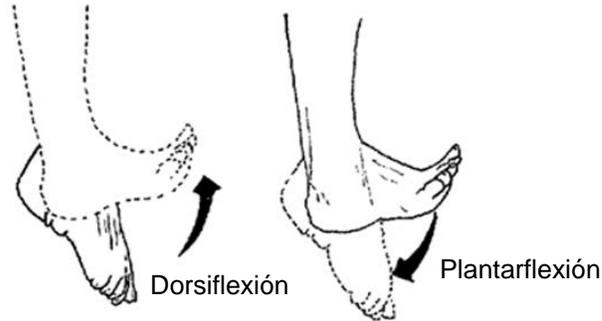


Figura 31. Movimiento de dorsiflexión y plantarflexión.

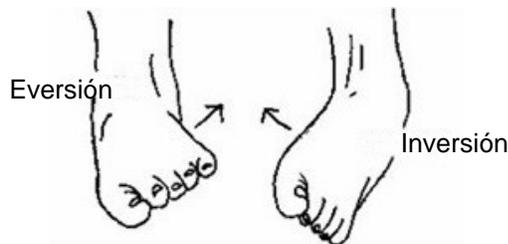


Figura 32. Movimiento de eversión e inversión.



Figura 33. Movimiento de abducción y aducción.

2.3 Robot paralelo de tres grados de libertad

En la figura 6 se muestra la estructura física del robot paralelo que sirve para realizar los movimientos angulares del tobillo del paciente, en base a las rutinas programadas. Como se puede observar en la parte superior se cuenta con un calzado cómodo y ajustable a la medida de diferentes tamaños de pies, desde la talla 22 a la 25, o en caso de ser necesario, el calzado utilizado puede ser cambiado con facilidad, brindando mayor comodidad a los pacientes.



Figura 34. Estructura del robot paralelo.

El sistema cuenta dos sensores de fuerza resistivos para realizar la parte de diagnóstico de tobillo midiendo la fuerza aplicada por el paciente, el sensor posee un rango resistivo de 100Ω a $100k\Omega$ contra un rango de fuerza de 10g hasta 10kg. Dichos sensores fueron ubicados en la plataforma del robot paralelo para sensar la presión realizada por el talón y la punta del pie. Para ello se colocaron dos objetos circulares de diámetro igual a los sensores de fuerza, figura 7.



Figura 35. Posicionamiento de sensores de fuerza resistivo.

Uno de los puntos importantes de este sistema es la posición inicial de los motores donde se instalan unos sensores de final de carrera para poder realizar una calibración siempre que se inicia, asegurando la posición inicial correcta del robot.

En la figura 8 se puede observar la localización de los sensores de final de carrera los cuales se encuentran ubicados justo al lado de la transmisión de engranaje, de tal forma que cuando los ejes lleguen a la posición más baja del prototipo, los switches se cierran y envían una señal al robot indicando su posición. Esto es para evitar el desgaste mecánico de las piezas del prototipo.



Figura 36. Posicionamiento de los sensores finales de carrera.

2.4 Componentes electrónicos

Para la etapa de adquisición de datos se utilizaron dos tarjetas NI PCI 6221 de National Instruments, debido a su robustez y alta velocidad en la adquisición de datos, además de que cuenta con múltiples entradas y salidas digitales, así como analógicas, la tarjeta de adquisición de datos se presenta en la figura 9.

La identificación de los pines entrada/salida se presenta a continuación:

- Contadores (x3): Utilizados para la lectura de los encoders ópticos.
- Entradas digitales (x3): Utilizados para la lectura de los sensores final de carrera.
- Entradas analógicas (x4): Utilizados para la lectura diferencial de los sensores de fuerza.
- Salidas digitales (x6): Utilizados para el control del giro del motor en los puentes tipo H, además para el control de velocidad de los mismos (mediante PWM).

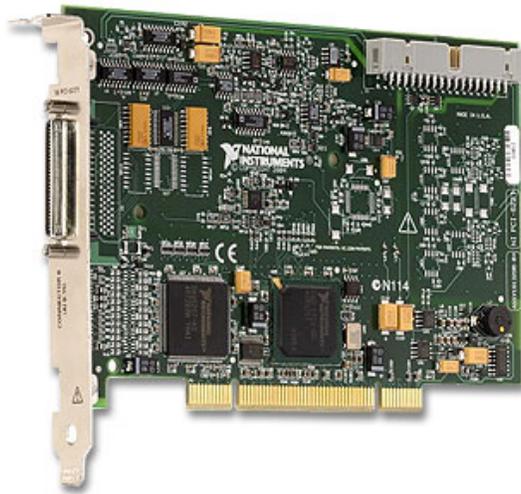


Figura 37. Tarjeta de adquisición de datos PCI 6221.

En la figura 10 se muestra el módulo de puente H L298N, utilizado en la etapa de potencia de los motores, se caracteriza por ser un circuito con doble puente H que permite manejar una corriente de hasta 2A, mediante él los motores reciben la señal de control para el sentido de giro, así como también la señal modulada para la regulación de la velocidad del motor.

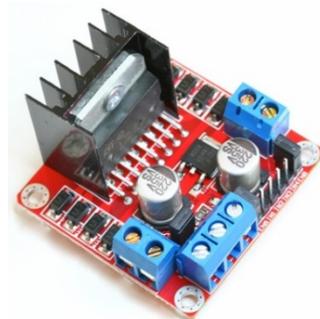


Figura 38. Módulo de L298N Puente H.



Se realizó un circuito con el inversor Schmitt-trigger, para ingresar una señal cuadrada a los contadores de la tarjeta NI PCI 6221. El circuito impreso y diagrama electrónico se pueden observar en la figura 11.

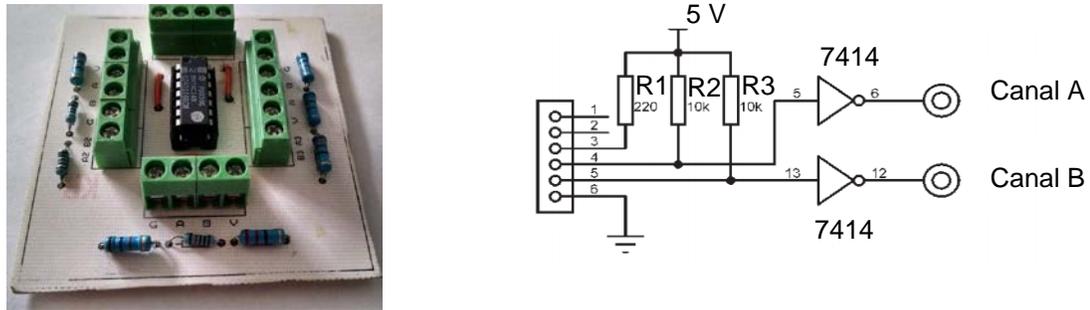


Figura 39. Circuito del inversor Schmitt-trigger.

2.5 Interfaz

El sistema está diseñado en arquitectura abierta uniendo hardware y software interactivo. Cuenta con una interfaz creada con el Software LabVIEW® de National Instruments®, la interfaz del robot rehabilitador posee un menú principal (figura 12) a partir del cual se pueden acceder a las demás ventanas del programa.

Como se observa en la figura 12, el Menú principal se divide en dos secciones, en la parte izquierda se encuentra la búsqueda del paciente, en este caso se registró el Número de Seguro Social (NSS). Si el paciente es nuevo o no está registrado en la base de datos del programa, basta con dar clic en el botón “Registrar”, el cual abrirá un formulario en una ventana distinta.

En la sección derecha del menú principal, el terapeuta seleccionará una de las 3 acciones que realizará el robot: Diagnosticar, rehabilitar de manera pasiva o rehabilitar de manera activa. Como se puede apreciar, los 3 botones se encuentran deshabilitados, esto es debido a que el terapeuta debe ingresar el NSS del paciente antes de que el robot realice alguna acción, con el fin de llevar un control y seguimiento en los resultados obtenidos.

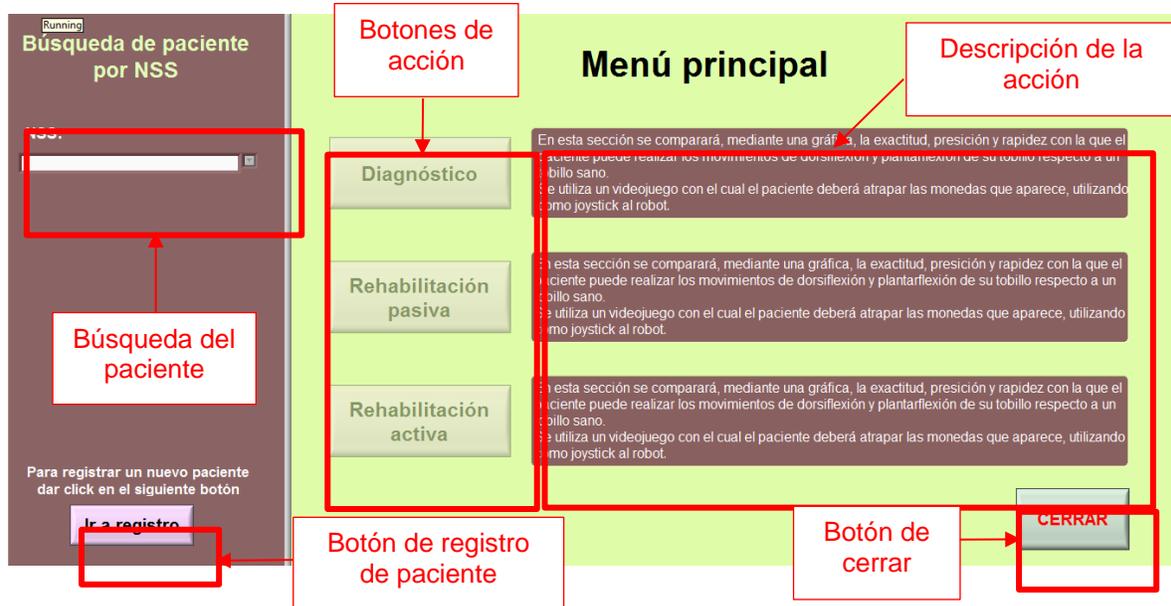


Figura 40. Panel principal de la interfaz.



En la figura 13 se puede observar el panel de diagnóstico, en el cual primeramente se configura la altura del robot en la barra de posición que se encuentra a la izquierda, ésta se establece de acuerdo a la altura del paciente, posteriormente se procede a definir la cantidad de minutos que durará el diagnóstico y se da clic en iniciar para que el paciente utilice el juego interactivo que se mostrara en la parte derecha, con las respectivas gráficas de posición ideal con respecto a la posición real del ángulo que puede formar el paciente con su tobillo.

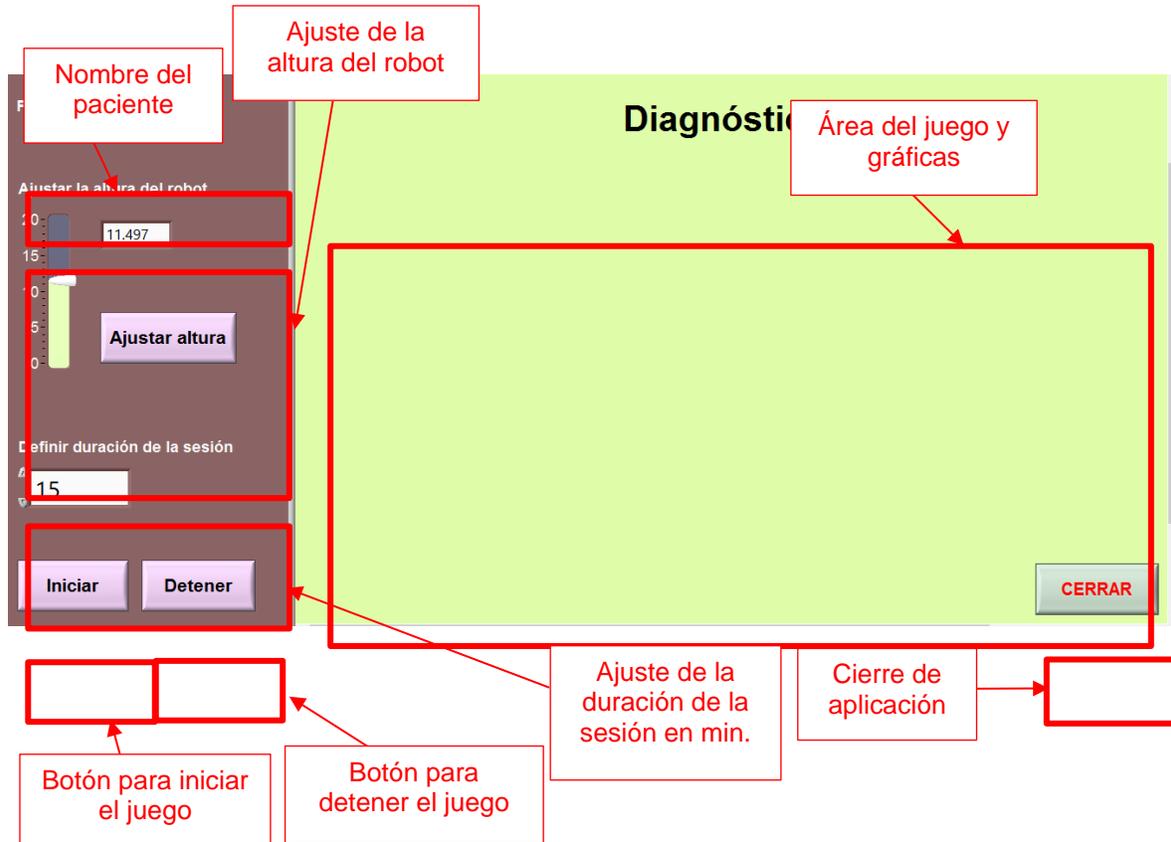


Figura 41. Panel de diagnóstico.

2.6 Controlador

Se programó un controlador para el sistema en la plataforma LabVIEW® de National Instruments®, en la figura 14 se presenta el diagrama de bloques del instrumento virtual. En el programa se realiza la lectura de los encoders la cual ya se encuentra expresada en grados por los contadores, dichos grados son convertidos a movimiento lineal con base en la varilla roscada (6 hilos por pulgada). Se establece una saturación con un límite superior de 5V y un límite inferior de -5V, esto con la finalidad de evitar sobrepasar los límites de voltaje que puede soportar el módulo del puente H L298N.

Se hace uso de 3 salidas analógicas las cuales permiten regular la velocidad del motor el cual conforme se acerca al setpoint reducirá su velocidad controlado por el PD, además se utilizan 3 salidas digitales con el propósito de enviar una señal digital en alto para que el motor gire en sentido horario y una señal digital en bajo para que el motor gire en sentido anti-horario.

El controlador es utilizado tanto en rehabilitación como en diagnóstico por lo cual se guardó como sub-VI para su fácil acceso y monitoreo de las gráficas correspondientes al valor deseado (Setpoint), la variable de proceso, el error y la variable manipulada por el controlador PD.

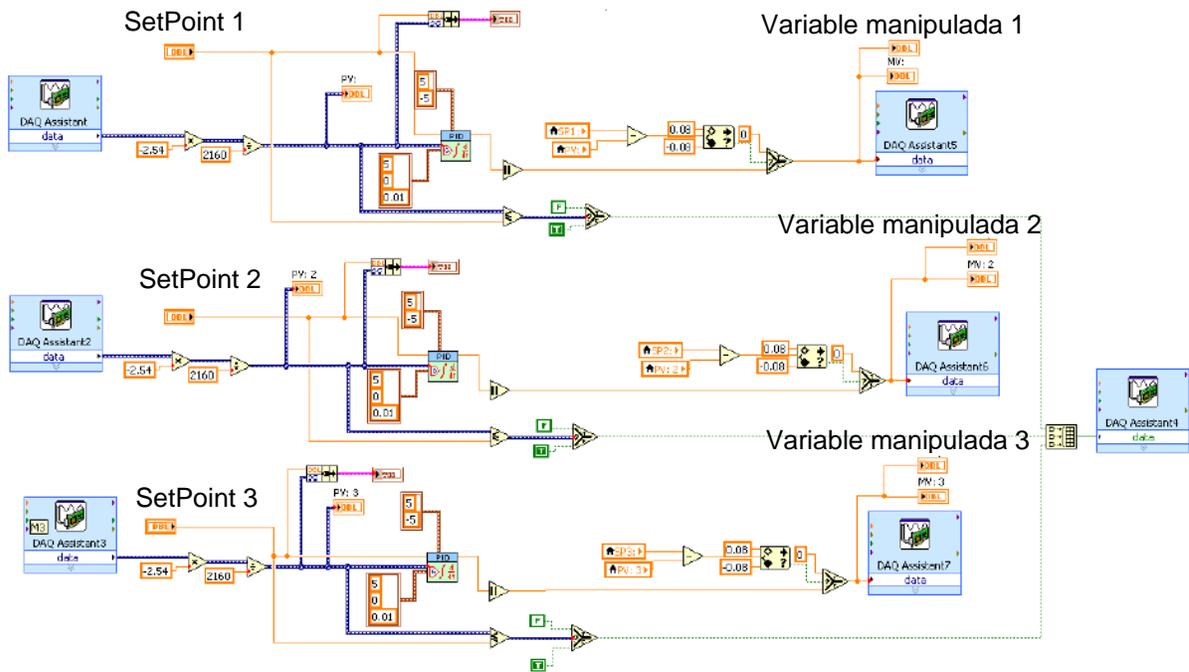


Figura 42. Controlador PD de motores en LabVIEW®.

2.7 Sistema de rehabilitación y diagnóstico de tobillo

En la figura 15 se observa el sistema de rehabilitación y diagnóstico del tobillo completo con su interfaz en LabVIEW® para el control de los ejes mediante los sensores de presión resistivos, así como también el juego interactivo para diagnosticar al paciente, éste tiene como actividad que mover su pie para atrapar monedas.



Figura 43. Sistema de rehabilitación y diagnóstico de tobillo.



3 Resultados

Para comprobar el funcionamiento del sistema de rehabilitación y diagnóstico se realizaron pruebas con cada uno de los ejes del robot, a continuación, se muestran los resultados del controlador.

La figura 16 corresponde a la respuesta del controlador PD de uno de los motores, en la cual se observa en color azul la posición ideal (Setpoint) y en color rojo la posición real, el sistema de control con retroalimentación presentó una respuesta sin sobreimpulso.

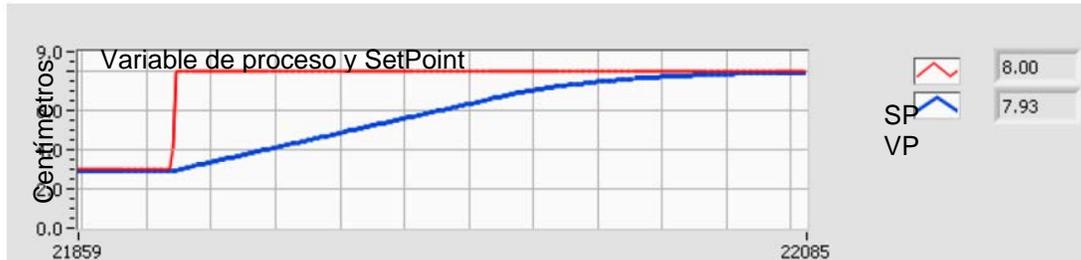


Figura 44. Respuesta transitoria del controlador PD de un motor.

En la figura 17 se muestra el comportamiento de la Variable Manipulada (VM), la cual es el voltaje aplicado al motor para regular la posición lineal de los ejes y tiene valores entre 0 y 5 V.

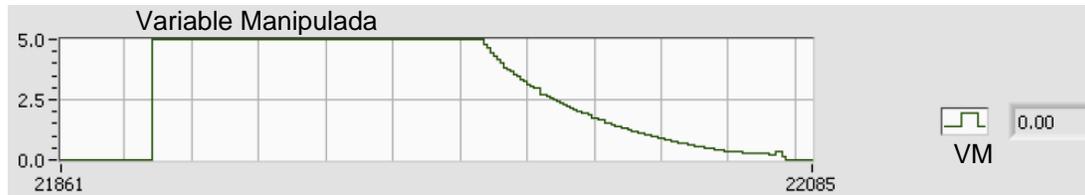


Figura 45. Variable manipulada de controlador PD de un eje lineal.

En la figura 18 se puede observar el error del control de posición lineal de un eje del robot, la cual tiende a cero conforme el eje se acerca a la posición ideal.

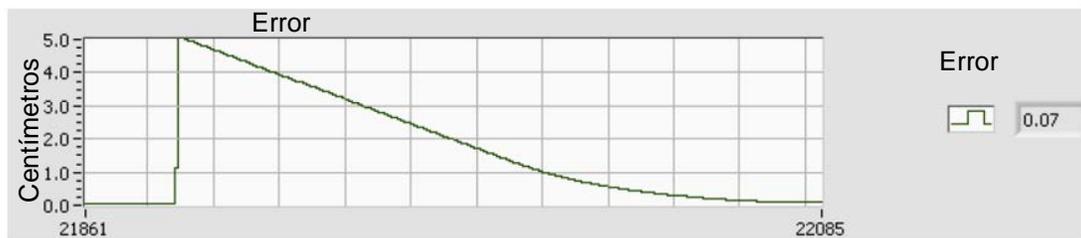


Figura 46. Error del controlador PD en un eje lineal.

Como se ha mencionado, para el diagnóstico y rehabilitación activa se realizó una aplicación interactiva con la cual el paciente, mediante los sensores de fuerza resistivos, mueve un cursor en forma de nave para atrapar monedas, la interfaz se puede observar en la figura 19.

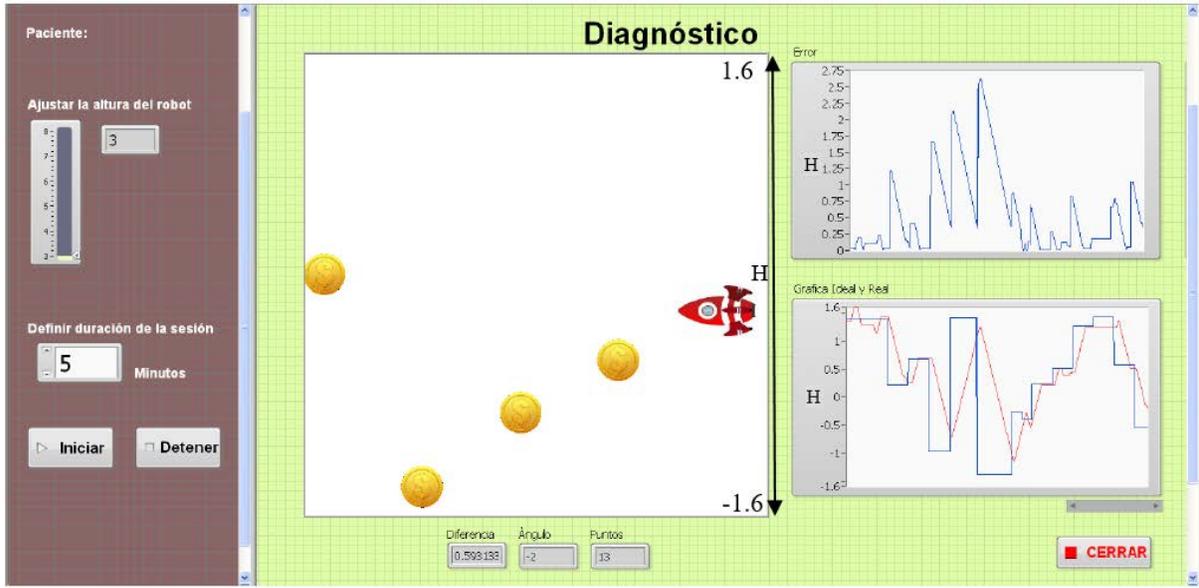


Figura 47. Juego interactivo en acción.

La posición de la nave depende de la diferencia de presión que aplique el paciente, es decir, si aplica mayor presión en el talón, el robot paralelo se inclina hacia atrás y la nave se mueve hacia abajo, en cambio si aplica mayor presión con la parte delantera del pie, el robot paralelo se inclina hacia adelante y la nave se mueve hacia arriba, como se puede observar en el monitor de la figura 20.



Figura 48. Nave en la posición más baja.

Una vez finalizado el tiempo de la sesión, se muestra una gráfica (figura 21) en donde se compara el movimiento ideal con respecto al movimiento dado por el paciente.

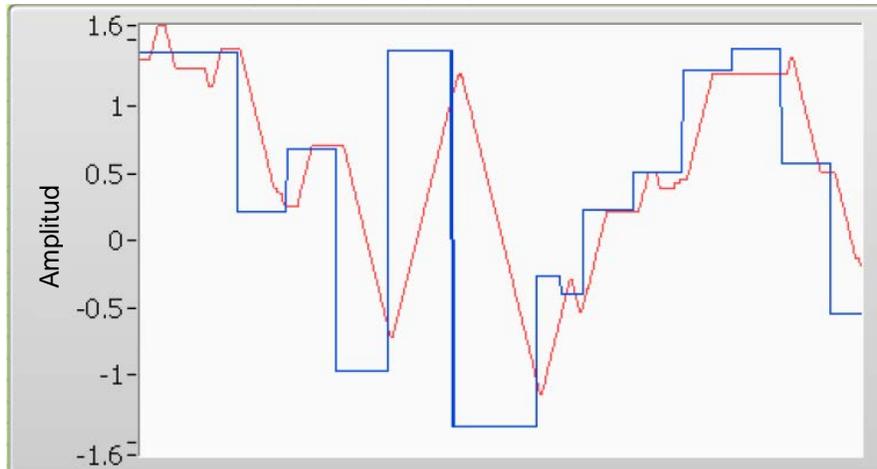


Figura 49. Gráfica de comparación entre el movimiento del paciente vs movimiento ideal.

La respuesta transitoria de los controladores y la gráfica de los errores, así como la gráfica diagnóstica fueron obtenidas de una persona sin lesión, como trabajo futuro se pretende aplicar el prototipo en pacientes con lesiones de tobillo y analizar resultados.

4 Conclusiones

En base a los resultados obtenidos se observa que se cumplió con el objetivo del robot paralelo de 3 GDL, el cual en base a las funciones que realiza permite ser una herramienta para el terapeuta de lesiones de tobillo, dando un análisis de la situación real del paciente (mediante la tabulación y gráfica del movimiento del paciente comparado con un movimiento ideal, así como el error obtenido), además de asistir en la rehabilitación activa del mismo. De igual forma puede apoyar con las rutinas necesarias en la rehabilitación pasiva del paciente. Aun cuando existen varios prototipos para apoyar la rehabilitación de lesiones de tobillo, son pocos los que tienen como objetivo hacer divertida la rehabilitación mediante el uso de juegos, característica que también posee el prototipo desarrollado. Por otra parte, el prototipo permite contar con un historial de la mejora del paciente, la cual no solo se basa en la experiencia del personal que realiza terapia de rehabilitación.

Referencias

- [1] Park J, Hahn S, Park JY, Park HJ, Lee H. "Acupuncture for ankle sprain: systematic review and meta-analysis", *BMC Complementary and Alternative Medicine*. 13(1), 55, 2013.
- [2] Secretaría de Salud, Guía de Práctica Clínica "Diagnóstico y Manejo del Esguince de Tobillo en la Fase Aguda para el Primer Nivel de Atención", Ciudad de México: CENETEC, 2013.
- [3] Franco-Chávez SA, Preciado-Serrano ML, García-Pelayo LJ, Vázquez-Goñi JM. "Análisis de los Accidentes de Trabajo y de Trayecto de los Trabajadores de un Hospital de Especialidades en Jalisco México", *Ciencia y Trabajo*. 13(41), 187/190, 2011.
- [4] Guzmán C., Carrera J., Ortega A., Salazar M., Gómez F. "Diseño y control de un sistema interactivo para la rehabilitación de tobillo, TobiBot", *Ingeniería Mecánica, Tecnología y Desarrollo*. Vol. 5, Núm. 1, 255-264, México, 2014.
- [5] Zhang M., Davies T., NandaKumar A., Xie S. "An assistance-as-needed control Paradigm for Robot-assisted ankle Rehabilitation", *Rehabilitation Process and Outcome*. 3, 15–17 doi:10.4137/RPO.S12340, 2014.
- [6] Thompson, C. "Manual de Kinesiólogía Estructural", Paidotribo, Barcelona, 2000.



Diseño de un Dispositivo Portamaletas Ajustable para Individuos con Movimiento Restringido en Entornos Aeroportuarios

Benítez Morales Alejandro, López de la Cruz Alejandra Patricia, Mendoza García Mauricio Angel* †

Escuela de Ingeniería, Universidad La Salle Pachuca, CP, 42160 San Agustín Tlaxiaca, Hgo.

*Correspondencia: Mauricio Angel Mendoza García, Escuela de Ingeniería. Universidad La Salle Pachuca, San Agustín Tlaxiaca, Hgo. Código Postal 42113

*† Correo: 132179@lasallep.mx

Resumen

El siguiente artículo presenta el desarrollo de un portamaletas seguidor el cual tiene como propósito facilitar el transporte de equipaje para discapacitados, y personas que presenten movimiento limitado ya que al viajar, las maletas son pesadas y estorbosas, haciendo que su traslado sea incómodo, limitando la independencia de las personas. El desarrollo del producto se basa en los pasos recomendados por "Engineering Design" por George Dieter y Linda Schmidt donde se hace un análisis multidisciplinario para obtener el diseño detallado del producto. El dispositivo es capaz de ajustarse a distintos tamaños de maletas por medio de una estructura mecánica innovadora, obtiene sus coordenadas por medio de un IMU, sigue al usuario mediante su vinculación con un celular que esté equipado con un acelerómetro y giroscopio, evade obstáculos mediante sensores y se mantiene a cierta distancia del usuario en todo momento.

Palabras clave: portamaletas, seguidor, discapacitados, desplegable.

1. Introducción

La manera de viajar ha cambiado al pasar del tiempo influyendo en la frecuencia y la comodidad con la que se hace. A pesar de su evolución una de las cosas que ha sufrido pocos cambios son las maletas. Antes del siglo XX lo común era transportar las pertenencias personales en baúles, se tiene registrado hasta 1897 que la palabra "suitcase" únicamente apareció 2 ocasiones en catálogos de viaje [1]. Hasta 1911 la maleta se populariza. Los primeros diseños de maletas no fueron la mejor solución, aunque fueran más pequeñas que los antiguos baúles, eran pesadas y estorbosas ya que estaban hechas de piel estirada sobre marcos de madera o metal. Fue hasta los años sesenta cuando se adaptaron otros materiales como plásticos [1]. En 1970 se comercializa la primera maleta con llantas y en 1987 surgió el asa extensible [1]. La dimensión de las maletas, con el paso del tiempo únicamente han sido modificadas por las regulaciones que existen en las líneas aéreas. En los últimos años, con la tendencia "Smart", han sido presentadas maletas con tecnología avanzada que permite mejorar la seguridad, recargar dispositivos electrónicos, sistemas de rastreo en caso de extravió, entre más funciones prácticas.



Con los cambios tan lentos que se han generado en la maleta no es sorprendente saber que no existen maletas especiales que ayuden a las personas discapacitadas. Solamente en México, en el 2010, 5 millones 739 mil personas reportaron tener alguna discapacidad [2].

De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2010, a nivel nacional, la dificultad más frecuente entre la población con discapacidad es la relacionada con la movilidad, ya que 58% de las personas de este grupo poblacional señala tener limitación para caminar o moverse” [2].

Si las personas parapléjicas buscan viajar, se ven en la necesidad de utilizar varias maletas pequeñas de tal forma que se distribuya el peso en toda la silla y así evitar cualquier accidente [3]. En ocasiones deben llevar varias maletas sobre las piernas haciendo que el transcurso del viaje sea incómodo. Esto produce la necesidad del desarrollo de una maleta o dispositivo que ofrezca mayor libertad y comodidad al usuario. Existen tres dispositivos que poseen características para ser aplicable a este ámbito, Olive, Budgee y Hop

Olive es un producto que aún no se encuentra a la venta. Su función principal es seguir al usuario en todo momento. Esta idea se enfoca más en el movimiento autónomo de la maleta, y no como un dispositivo que cargue a la misma. Tiene ciertas desventajas como los son sus componentes eléctricos los cuales no le permiten ser llevadas como maletas de mano en el avión [4].

Budgee tiene mayor parentesco con la idea que se desea implementar, ya que puede cargar el equipaje del usuario hasta un límite de 50 lb. Este dispositivo ofrece la comodidad de una estructura desplegable, facilitando el traslado del mismo. La tecnología que utiliza para el seguimiento es radiofrecuencia, limitando al usuario en siempre mantener el dispositivo frente al seguidor para que este cumpla correctamente su función, en caso contrario podría dejar de funcionar adecuadamente. Es un artefacto que no va enfocado a un mercado de aerolíneas y su precio es bastante elevado, \$1400 USD, aproximadamente \$25734 MXN [5].

Por último, se encuentra el dispositivo llamado Hop ; donde en [6] se puede ver que es lento y oscila. Una idea donde el usuario se ve obligado exclusivamente a ocupar el producto como una valija sin la posibilidad de cargar lo que el desee. Además de tener dimensiones muy pequeñas, que limitan el equipaje de la persona. Cabe mencionar que los tres dispositivos anteriores, no son adaptables a cualquier maleta.

El portamaletas propuesto es un dispositivo abatible y ajustable a la mayoría de las maletas convencionales del mercado. La base del dispositivo donde se colocan las maletas tiene medidas de aproximadamente de 29 x 48 cm y puede extenderse hasta 43 x 75 cm. El usuario mediante una aplicación en el celular se vincula (vía Bluetooth) con el portamaletas y una vez iniciada la comunicación, el dispositivo empieza a seguir al usuario manteniendo siempre una distancia entre ambos. Esta distancia solo es afectada si el dispositivo encuentra objetos en su camino por medio de los sensores ultrasónicos situados en puntos estratégicos.

2. Desarrollo de Portamaletas

Para un diseño correcto se opta por estructurar ciertas etapas basadas en el desarrollo de un producto que se especifica en [7]. Cada etapa está enfocada en englobar cierta tarea que debe ser cumplida para así poder obtener el objetivo el cual busca: Diseñar un dispositivo ajustable a maletas que siga a una persona, con el fin de facilitar el traslado dentro de un entorno urbano, incrementando la movilidad y comodidad del usuario.

La etapa 1 es una planeación previa al desarrollo del proyecto, donde se realiza una investigación de mercado y se revisa que tan factible es el producto, todo con el fin de determinar qué tan viable es el proyecto.



La etapa 2, consiste en el desarrollo de la idea, recopilar información para identificar necesidades, proponer diferentes maneras de solucionar el problema mediante bosquejos (conceptos) y escoger el más adecuado de acuerdo a ciertas consideraciones

La etapa 3 se enfoca más en el funcionamiento del producto como a su vez los subsistemas que lo componen. Se busca el material más adecuado para el funcionamiento y se establecen las dimensiones.

En la etapa 4 se especifica todo el producto, desde el material hasta la manufactura a realizar. A su vez se obtiene el diseño CAD y se estima el precio del producto considerando el costo por cada unidad, la inversión necesaria, gastos, costo de manufactura, etc. También se consideran asuntos legales de patente.

En la etapa 5 se busca la evaluación de expertos que ayuden a verificar la viabilidad del diseño y presentar recomendaciones.

En las etapas 6 y 7 es necesario realizar una revisión del proyecto y saber si se puede continuar con el mismo. En dichas etapas comienzan la construcción de prototipos para conocer el comportamiento y así llegar a la manufactura del producto final. Cabe mencionar que dichas etapas aún no están incluidas dentro del desarrollo del portamaletas.

A continuación, se muestra la Figura 1 donde se presenta la secuencia de diseño.

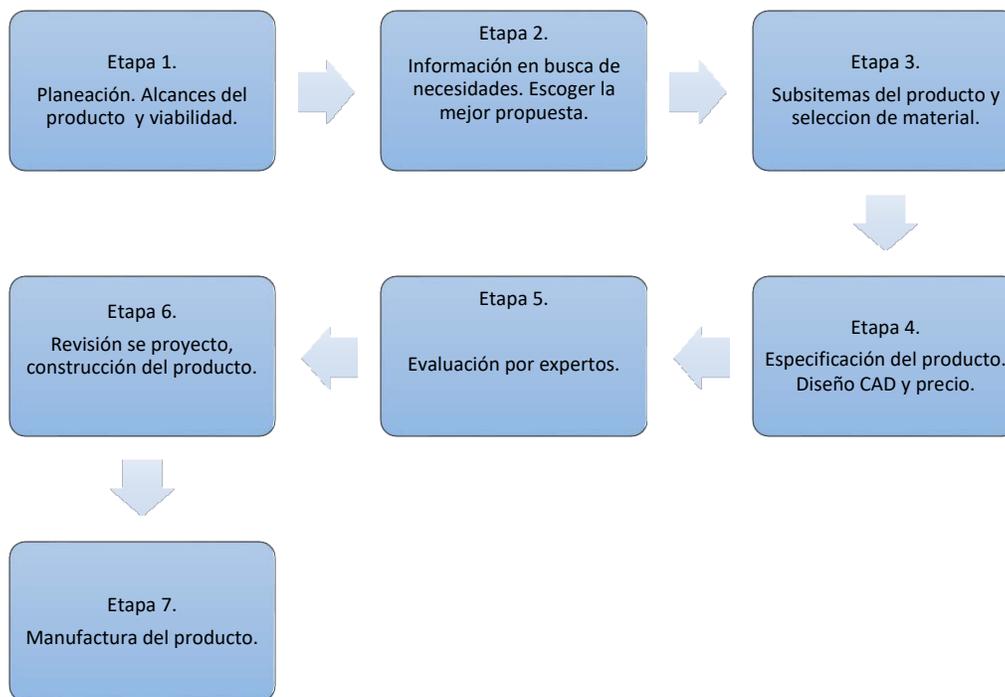


Figura 1. Diagrama de secuencia de diseño.

2.1 Etapa 1

Como se menciona en la introducción los competidores del portamaletas son Olive, Budgee y Hop, donde Budgee es el más parecido a la propuesta; pero no la satisface plenamente ya que



no es abatible ni adaptable a la mayoría de las maletas convencionales y no está diseñado para los entornos aeroportuarios.

Para validar si el proyecto es de interés para la población a la que se dirige, se realiza una encuesta a 127 personas que presentaban alguna dificultad para caminar o moverse (incluyendo uso de muletas, bastón o personas cargando un bebé). Las encuestas han sido realizadas por 64 mujeres y 62 hombres (un participante no especifico sexo), el 53% de los participantes son personas entre 21 y 30 años; el 20% personas entre 31 y 40 años; el 17% de 20 años o menos; el 6 % entre 41-50 años y solo el 4% mayor a los 50. En las Figuras 2, 3 y 4 se muestran los resultados de las encuestas realizadas.

Se considera que el número de ventas sea bajo ya que se toman los siguientes factores en consideración: el portamaletas es el primer producto en su tipo a la venta dentro del país y aproximadamente 233,000 personas (7% de la población) a la que va dirigida el producto tienen el poder adquisitivo para comprarlo [4]. Debido a que la competencia es casi nula en el mercado es viable el desarrollo del producto.

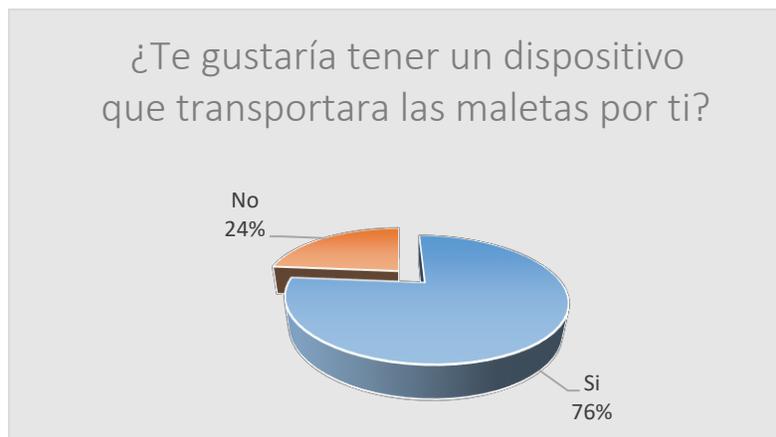


Figura 2. Número de personas interesados en un dispositivo portamaletas

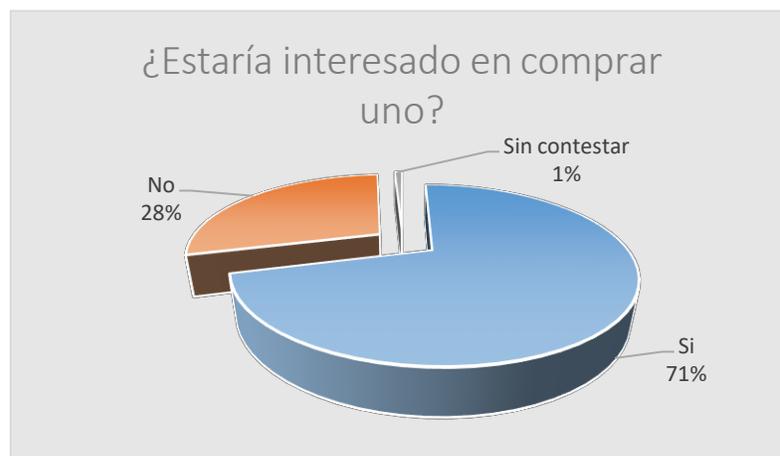


Figura 3. Número de personas dispuestas a comprar un portamaletas

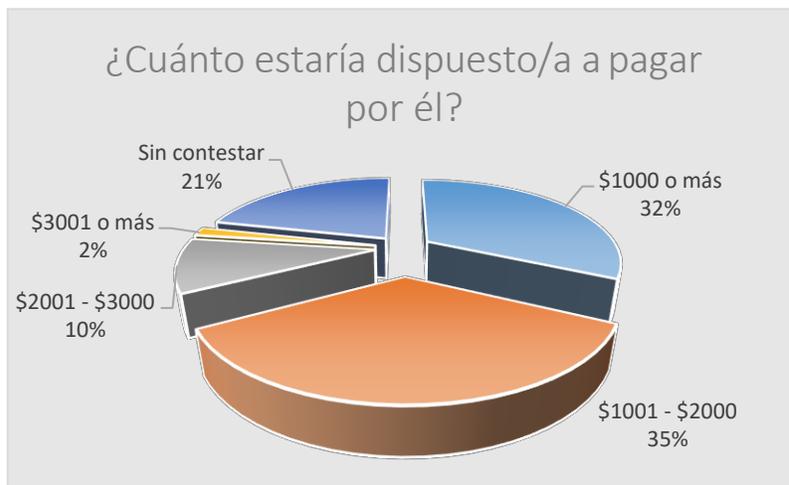


Figura 4. Precio que los participantes estarían dispuestos a pagar por el dispositivo.

2.2 Etapa 2

En esta etapa se definen las necesidades del cliente mediante las observaciones hechas a usuarios en silla de ruedas, en los comentarios escritos en las encuestas y por medio del estudio que se realizan a los competidores. De acuerdo a ciertos análisis las necesidades de diseño son: seguridad, economía, peso y tamaño. Tomando esos puntos por cumplir se establecen las siguientes directrices de diseño.

- Ser permitido por la TSA (Administración en Seguridad en el Transporte).
- Ser capaz de mover cargas entre 4 a 40kg.
- Realizar un diseño Robusto.
- Seleccionar materiales reciclables
- Durabilidad de producto y sus materiales.
- Desplazamiento uniforme. No debe de tambalearse.
- Seguridad de la(s) maleta(s).
- Facilidad para extender y compactar el dispositivo.
- Capacidad de caber dentro de una maleta documentada sin quitar mucho espacio.
- Ajustarse a las medidas que el usuario necesita para transportar su maleta.

El proceso continúa completando la Tabla 1. donde se muestran los sub-problemas y sus posibles soluciones.

Tomando en cuenta las soluciones propuestas, se generan cuatro diferentes conceptos de diseño.

El concepto uno (Figura 5) consta de un dispositivo cuyas paredes solo permiten el ajuste de altura del portamaletas mediante un sistema plegable tipo pantógrafo. El seguimiento se soluciona con una cámara y la detección de objetos se logra por medio de ultrasónicos. El dispositivo también cuenta con cuatro llantas acopladas a un motor. El ancho y largo de la base del dispositivo no es ajustable.

Por otro lado, el concepto dos (Figura 6) tiene la capacidad de modificar todas sus dimensiones ya que el marco propuesto es perfil en L el cual se ajusta con tornillería. El centro de la base cuenta con láminas barrenadas las cuales ayudan a que se ajuste a las medidas del marco.



Se propone un IMU para seguir al usuario y sensores electromagnéticos para la detección de objetos. El sistema de locomoción incluye cuatro ruedas, cada una con su propio motor. El dispositivo no tiene paredes, pero cuenta con cuatro postes abatibles las cuales evitan que las maletas se caigan del portamaletas.

TABLA 1. Tabla morfológica para el dispositivo portamaletas

Conceptos de solución de los sub-problemas				
Seguimiento	Pared expandible	Base del dispositivo	Detección de objetos	Ruedas
Cámara	Laminas retráctiles	Con barras de fijación	Laser	Omnidireccionales
Láser	Perfil en L	Dos cajas en C	Sensor ultrasónico	Convencionales
IMU	Brazos	Con guía y riel	Sensor infrarrojo	
Sensor de radiofrecuencia	Sistema plegable tipo pantógrafo	Con dimensiones invariables	Sensor electromagnético	

Las paredes del tercer concepto (Figura 7) están construidas por marcos retráctiles los cuales permiten el ajuste de altura del dispositivo. Estos marcos están en C por lo cual se puede ajustar solo una dimensión de la base. El seguimiento se hace mediante un láser y se opta por un sensor ultrasónico para la localización de objetos. Al igual que el segundo concepto, éste cuenta con cuatro ruedas, cada una acoplada a un motor como subsistema de locomoción.

Por último, el concepto cuatro (Figura 8) también cuenta con una base ajustable ya que hace uso de un material hueco con un material dentro que funciona como estructura base. El ajuste de tamaño se hace mediante pines. El centro de la base igual puede ajustarse a las dimensiones de la base por medio de una lámina y perfil en C. Para estabilidad del dispositivo se propone hacer uso de cuatro ruedas locas y el movimiento del dispositivo se hace mediante dos llantas acopladas a motores planetarios. El seguimiento se logra con un IMU y la detección de objetos con sensores ultrasónicos.

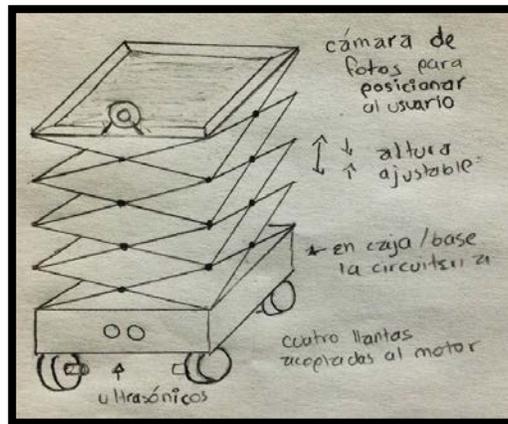


Figura 5. Concepto 1

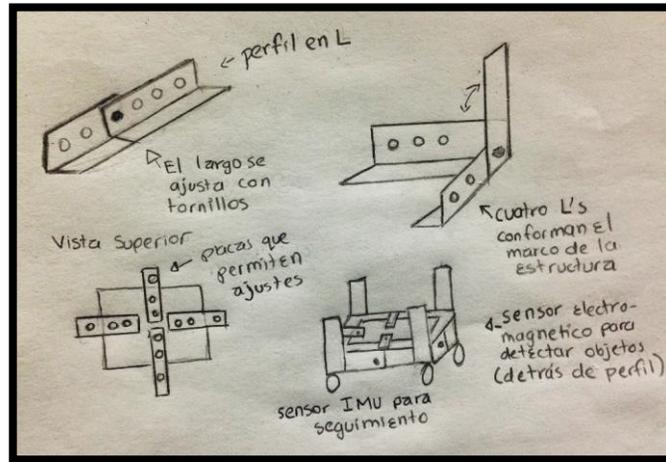


Figura 6. Concepto 2

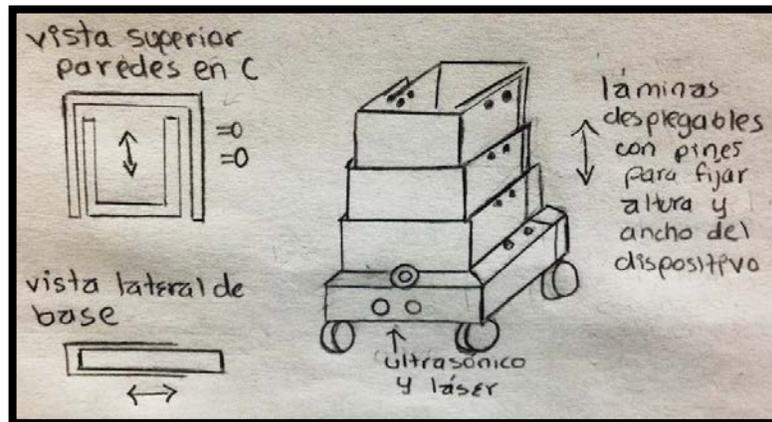


Figura 7. Concepto 3

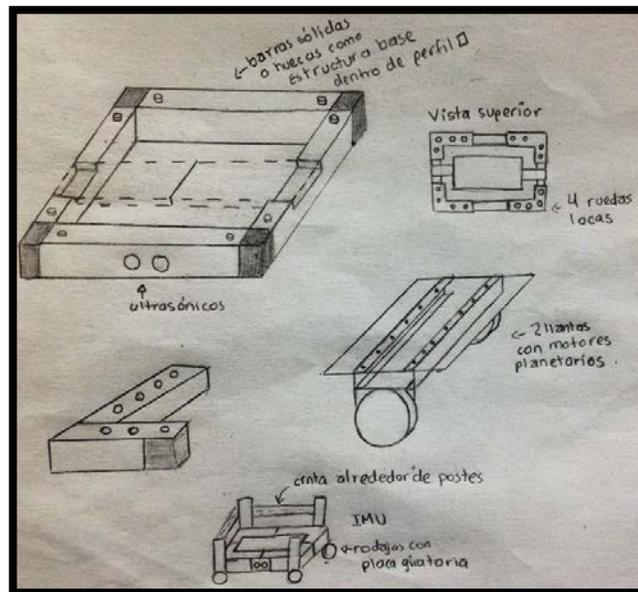


Figura 8. Concepto 4



Al comparar los conceptos el 1 y 3 se descartan como posibles soluciones de diseño. El primero se excluye porque solo permite ajustar la altura de las paredes. Por otro lado, el concepto 3 se rechaza porque los procesos de manufactura requeridos para la pared son procesos especiales, además la altura de cada lámina está limitada por el ancho de la base. A su vez la base es un inconveniente debido a que solo permite ajustar el ancho del portamaletas en una sola dirección.

Los conceptos 2 y 4 ofrecen una solución más viable debido a que ninguno de los dos requiere procesos de manufactura complejos o de herramientas costosas. Para determinar cuál de los dos tiene mayores ventajas, se realiza una matriz de evaluación (Tabla 2) en donde se consideran aspectos importantes del dispositivo y de su manufactura. En este caso los aspectos a evaluar son: la facilidad de ajuste de tamaño del dispositivo, la facilidad para manufacturarlo, la mínima posibilidad de perder piezas, el funcionamiento óptimo y fácil del sensor de seguimiento, tamaño y peso. Para calificar cada aspecto el equipo de diseño llega a un consenso y le da una calificación de 0 a 4 donde cero significa que el concepto brinda una solución inadecuada para el aspecto y 4 como una excelente solución.

TABLA 2. Matriz de evaluación para alternativas de solución

	Concepto 2	Concepto 4
Facilidad para ajustarse al tamaño de la maleta	1	3
Facilidad para manufacturar	4	4
Menor pérdida de piezas	1	4
Sensor de seguimiento	4	4
Tamaño	3	3
Peso	4	3
Costo	4	2
TOTAL	21	23
*Calificado en escala de 5: 0 = inadecuado, 1=insuficiente, 2= satisfactorio, 3= bueno, 4= excelente		

De acuerdo a la matriz de evaluación se decide desarrollar el cuarto concepto. Como resultado de la evaluación el concepto cuatro recibe mayor puntuación ya que una de las desventajas principales del concepto dos es que el usuario tiene la necesidad de usar herramientas para el ajuste de tamaño y que el diseño requiere el uso de tornillería la cual corre el riesgo de ser perdida fácilmente dentro de un aeropuerto. Por lo tanto, se decide seguir desarrollando el cuarto concepto y así implementar mejoras.

2.3 Etapa 3

El dispositivo se divide en tres subsistemas: el estructural, el de seguimiento y el de locomoción. El subsistema estructural tiene el propósito de cumplir con una de las características fundamentales del dispositivo, el cual es poder ser ajustable dimensionalmente. El ajuste debe ser rápido y sencillo, sin la necesidad del uso de herramientas, debido a que estas pueden ser extraviadas. Además, se requiere que este subsistema sea lo más ligero posible sin perder propiedades de carga, es decir, que sea capaz de soportar los 40 kg. Por esta razón, se busca que no toda la base sea de acero por lo que se considera un material que tenga propiedades semejantes al acero. El mejor candidato es el nylamid ya que tiene un peso menor que el acero y posee propiedades mecánicas favorables para el diseño. A su vez se opta por un perfil de acero para estructuras mecánicas que permita colocar el nylamid por dentro, permitiendo tener el control sobre el largo de la estructura. De igual manera, el subsistema estructural debe acomodarse de tal forma que permita albergar en él a los subsistemas de seguimiento y locomotriz.

El subsistema de seguimiento se encarga que el portamaletas siga al usuario de forma adecuada, para esto se necesita adquisición de datos y su procesamiento. Este subsistema considera usar un IMU (Unidad de Medición Inercial) para obtener las coordenadas del dispositivo; se tendrán



sensores ultrasónicos para evitar que la estructura del portamaletas no choque con objetos o personas y provoque una falla en el dispositivo. También se utiliza un microcontrolador para procesar los datos y un módulo Bluetooth para poder vincular la estructura con el celular del usuario de tal forma que pueda determinar su ubicación. En esta etapa es necesario desarrollar una aplicación móvil para facilitar el manejo del portamaletas la cual se decide mandar a desarrollar de forma externa.

Por último, se encuentra el subsistema de locomoción el cual debe funcionar de acuerdo a las señales que se reciban del microcontrolador y debe proporcionar un desplazamiento uniforme. Para lograrlo se opta por utilizar dos ruedas acopladas a los ejes de los motores planetarios, 6 ruedas locas, de las cuales 4 brindan estabilidad de movimiento mientras que las otras dos se encargan de distribuir el peso de la base estructural la cual se encarga de recibir la mayor carga. Cada motor tiene un puente H como interfaz de potencia.

Por último, los motores y los componentes electrónicos son alimentados por medio de 12 pilas 18650 de litio-ion recargables, modelo de 3.7 V a 3400 mAh. Estas pilas se eligieron porque son permitidas por la TSA para llevar dentro del equipaje de mano.

Las dimensiones del portamaletas son de aproximadamente 32 x 50 x 29 cm (en su forma compacta) y se expandirá hasta 43 x 75 x 29 cm (ancho, largo alto), teniendo la posibilidad de ajustarse a diferentes maletas (que estén dentro de este rango de dimensiones). Ver figura 9 y 10.

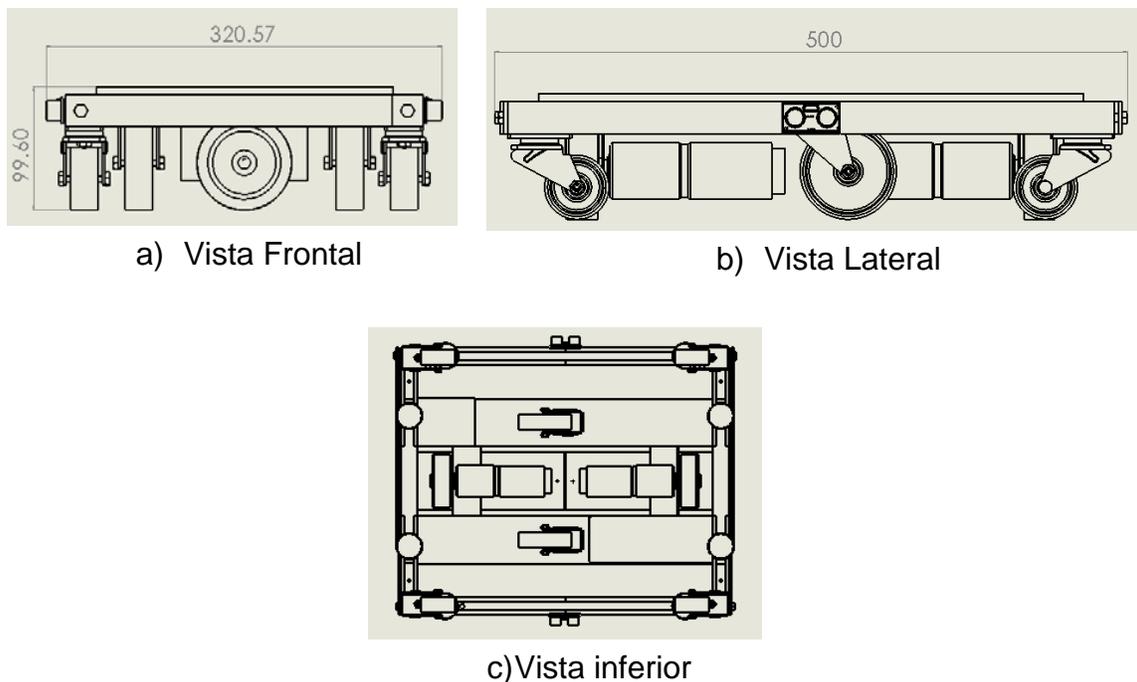


Figura 9. Vistas del dispositivo en forma compacta (cotas en mm)

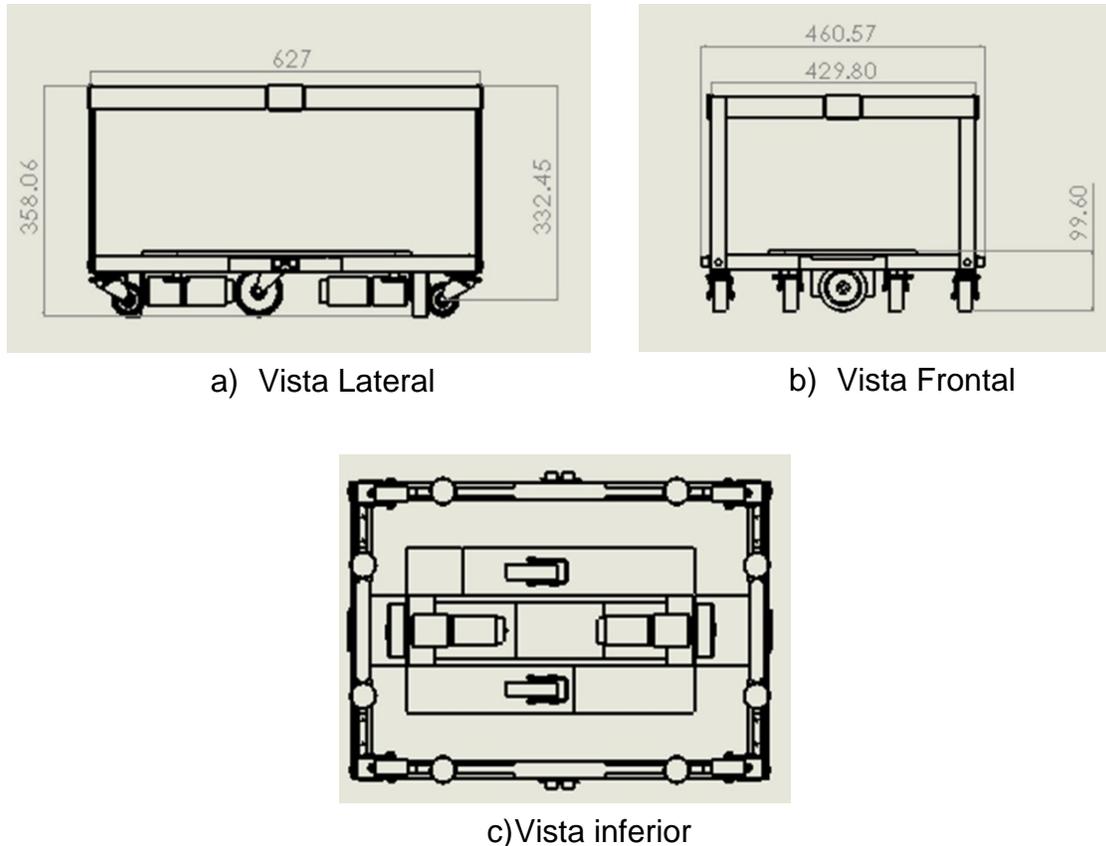


Figura 10. Vistas del dispositivo extendida a una de las posibles dimensiones (cotas en mm)

2.4 Etapa 4

Los materiales a usar para el subsistema estructural son los siguientes: barra de nylamid XL solida cuadrada de 1", perfil C100, placa de nylamid XL de ¼" y perfil 154. Ya que algunas partes tienen que deslizarse entre sí, se necesita el uso de lubricante para así reducir la fricción y el ruido que se pueda causar por las partes móviles. El material que se elige es el nylamid XL debido a que tiene la propiedad de auto lubricación. También, el proceso de manufactura de este subsistema no tiene ninguna complicación y tiene un costo bajo ya que solo se requieren hacer cortes, barrenar, soldar y fijar. Por tal motivo, se decide mandar a maquilar las piezas, y así evitar gastar horas hombre y a su vez evitar comprar maquinaria. Otro material que se considera para este subsistema son placas de aluminio (para los postes abatibles), perillas de plástico para facilitar el ajuste de tamaño y opresores con resorte para evitar el uso de tornillos que fácilmente se pueden perder.

El subsistema de locomoción consiste de dos motores DC planetarios con capacidad de torque de 10 N.m cada uno. Los cálculos para obtener la potencia se hacen considerando el peso máximo a mover y una velocidad lineal de 2 km/hora. Se usan dos ruedas de 9.6 cm de diámetro, cuatro rodajas de placa pequeña de 2 ¾" de altura total, dos rodajas de placa pequeña de 3-7/8" de altura total, y dos puentes H.

Los componentes principales del subsistema de seguimiento son un microcontrolador (Atmega328), un sensor IMU (9DOF), dos sensores ultrasónicos (US-100), un módulo Bluetooth, un controlador para motor de CD (VNH5019), un celular con giroscopio y acelerómetro; entre otros componentes electrónicos como capacitores, resistencias reguladoras de voltaje, etc. La PCB se



envián a manufacturar de manera externa, para evitar invertir en maquinaria ya que el volumen de piezas a construir no es alto.

Una vez seleccionado el material a usar y la manera en que se manufactura las piezas se opta por determinar el costo y los gastos reales que conllevan el proyecto. Por lo que se elabora una corrida financiera a tres años en donde se proyecta el primer mes con 0 ventas y en el segundo con 5 unidades, duplicando las unidades vendidas por mes hasta alcanzar 80 unidades, conforme el producto se vuelve más popular las ventas aumentarán. Después de dos años de estar disponible al público, las ventas se sostienen a 220 unidades por mes ya que se tiene planeado exportar para ese entonces.

Se estima que el costo unitario por dispositivo sea de \$10,538.53 MXN, y se establece un precio por contribución de \$15,000 MXN, quedando por debajo del costo del competidor más cercano (Budgee). Al mandarse maquilar las distintas piezas del dispositivo se redujo la inversión necesaria y deja que la ganancia del producto se establezca principalmente por su grado de innovación. En las Figuras 11,12 y 13 se muestra un modelo en CAD del dispositivo portamaletas.

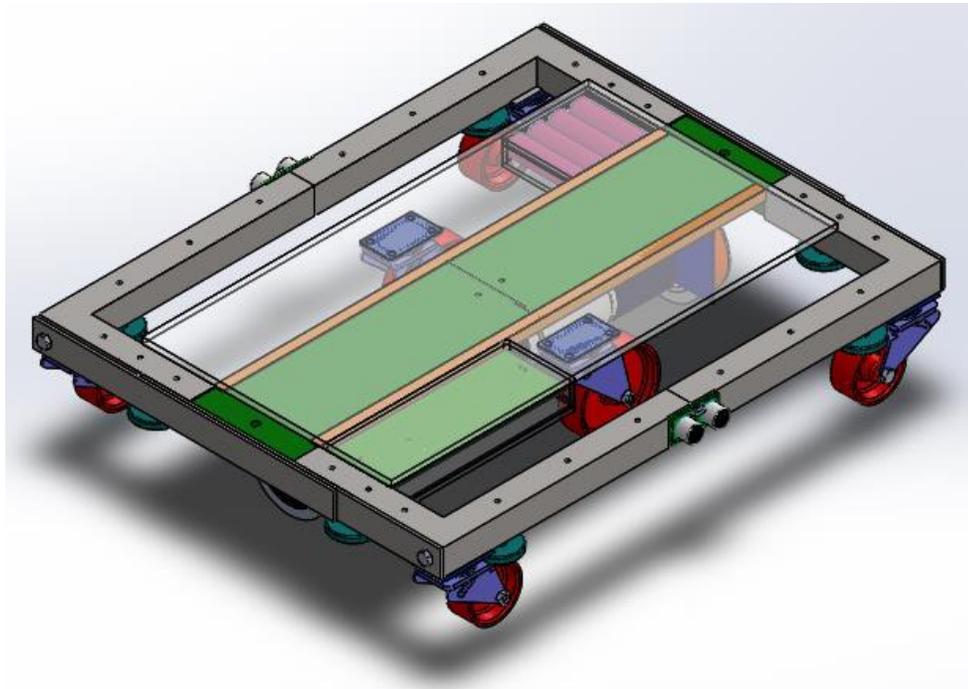


Figura 11. Vista isométrica del dispositivo en forma compacta

2.1 Etapa 5

Después de una evaluación por expertos se recomienda que se integre un sistema de suspensión al de locomoción. Esto para que el sistema motriz siempre este en contacto con la superficie a pesar de las irregularidades con las que se encuentre en el camino.

Posteriormente, se realiza un análisis de esfuerzos con el propósito de validar la selección de materiales el cual indica que los conjuntos de materiales a utilizar están sobredimensionados, ya que poseen un módulo de Young muy alto, por lo que se decide buscar materiales alternos que ayuden a disminuir el peso y el precio del dispositivo.

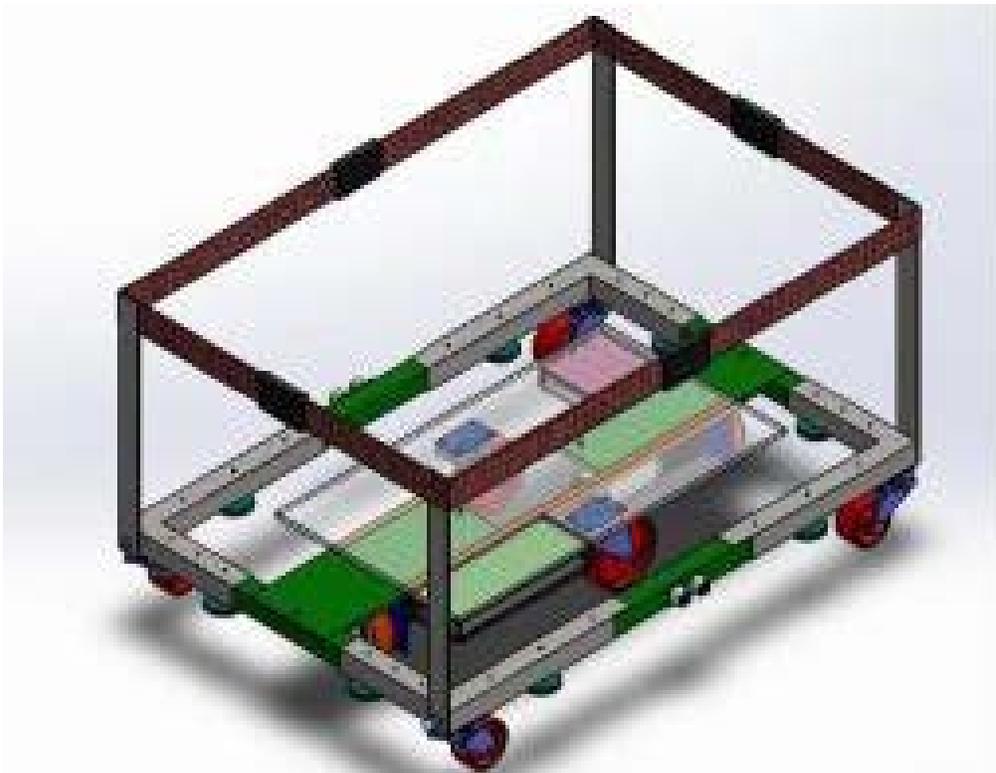


Figura 12. Vista isométrica del dispositivo extendido



Figura 13. Dispositivo con maleta



3. Funcionamiento

El enfoque principal que tiene el portamaletas es para personas con cierta discapacidad o dificultad motriz, por lo que el funcionamiento debe ser lo más sencillo posible. A continuación, se tienen los pasos a seguir para tener un buen uso del dispositivo:

- Se despliega la estructura al tamaño de la maleta deseada, por medio de los perfiles y con ayuda de los opresores.
- Se procede a encender el dispositivo mediante el interruptor que se encuentra integrado en la estructura.
- Se coloca la maleta en el espacio destinado
- El usuario tiene que entrar a la aplicación móvil para vincular el celular con dispositivo por vía Bluetooth, acción que puede tomar unos segundos.
- Teniendo el vínculo el usuario puede comenzar su traslado con el seguimiento correspondiente del dispositivo.
- Para finalizar únicamente debe interrumpir el vínculo entre el celular y el dispositivo para así tomar la maleta, apagarlo y reducir las dimensiones de la estructura.

El usuario debe tener en cuenta que la autonomía del dispositivo dura 2.2 horas de uso continuo, por lo que es necesario portar con baterías de repuesto para un mayor periodo de funcionamiento. Se considera que la estructura únicamente está hecha para un funcionamiento en áreas regulares, es decir, no se puede esperar un buen comportamiento en un terreno irregular, debido a que la suspensión que posee, está diseñada compensar pequeños desniveles de superficies.

Cabe mencionar que es solo el concepto de funcionamiento del producto, una vez concluida la etapa 5 se procede a la construcción del prototipo.

4. Resultados

El proyecto del dispositivo portamaletas resulta ser un proyecto viable debido a que 8 de 10 directrices se cumplieron; sin embargo, dos de ellas no fueron alcanzadas. El dispositivo puede ser desarmado fácilmente cuando haya cumplido con su ciclo de vida, pero algunos materiales no son reciclables; por ejemplo, el nylamid no se recicla tan fácilmente ya que las resinas dejan de ser puras perdiendo su calidad. Los materiales electrónicos también son difíciles de ser reciclados. El acero usado en los perfiles tiene la ventaja de ser usado como chatarra en el proceso de fundición. Esto hace que solo una pequeña porción del dispositivo pueda ser reusado. Por lo tanto, se decide buscar otros materiales con características semejantes a los propuestos para tratar de optimizar el nivel de reciclaje del dispositivo. Por otro lado, aún no se está desarrollando el sistema de seguridad para el portamaletas ya que este iría en conjunto con la aplicación móvil; pero se considera una alarma sonora cuando el portamaletas se aleje más allá de la distancia programada.

5. Conclusiones

El proyecto del dispositivo portamaletas presenta un alto grado de innovación ya que no existe un producto en el mercado que se asemeje a él. La estructura expandible y fácil de ajustar es una de sus ventajas principales permitiendo que el usuario adapte las dimensiones a su conveniencia para transportar una o múltiples maletas. Además, con la suspensión se garantiza la tracción constante del sistema de locomoción aumentando el número de superficies en la que puede ser utilizado. Esta adaptabilidad permite encontrarle diferentes aplicaciones fuera de entornos aeroportuarios siempre y cuando su uso respete los límites de peso.



Otra ventaja sobre la competencia existente es que los requerimientos de la TSA se cumplen permitiendo al usuario llevar el dispositivo consigo durante todo su viaje, por lo que el dispositivo puede ser compactado y guardado dentro de las maletas documentadas en cualquier compañía aérea, reduciendo daños al mecanismo.

El dispositivo portamaletas ofrece una solución fácil y rápida a los impedimentos de movimiento de los usuarios principales brindándoles mayor independencia y un mejor estilo de vida a un precio competitivo.

Referencias

- [1] Gross, D. A. (2014, May 9). "The History of the Humble Suitcase". Retrieved July 18, 2016, from: <http://www.smithsonianmag.com/history/history-humble-suitcase-180951376/?no-ist>
- [2] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2013). "Las personas con discapacidad en México, una visión al 2010". México: INEGI.
- [3] Luggage Secrets of a Wheelchair Traveler. (2014). Retrieved July 18, 2016, from <http://www.miusa.org/resource/tipsheet/rains>
- [4] McGlaun, S. (2016, July 11). Olive Autonomous Suitcase Will Follow You Around the Airport. Retrieved July 18, 2016, from <http://technabob.com/blog/2016/07/11/olive-autonomous-suitcase/>
- [5] McGrath, J. (2015, March 15). "My Budgee and me: Is the world ready for this grocery-carrying robot sidekick?" Retrieved July 18, 2016, from <http://www.digitaltrends.com/home/budgee-is-a-followme-robot-that-carries-your-things/>
- [6] Varley, L. (2012, October 14). "Hop The suitcase that follows you everywhere" | News | Geek.com. Retrieved July 18, 2016, from <http://www.geek.com/news/hop-the-suitcase-that-follows-youeverywhere-1521885/>
- [7] Dieter, G. E., & Schmidt, L. "Engineering Design", McGraw-Hill, EUA, 5th ed, 2013.



Dispositivo microposicionador XYZ para aplicaciones en fibras ópticas de vidrio

Talavera Velázquez Dimas¹, Rivas Araiza Edgar Alejandro¹, Mota Muñoz Francisco Gustavo²

¹Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, Querétaro, Qro. C.P. 76010.

²Universidad Politécnica de Guanajuato, Ingeniería Robótica, Cortazar, Gto. C.P. 38483.

Resumen

La dificultad de alcanzar y mantener la alineación y el acoplamiento en experimentos donde se requieren hacer conducir señales láser en fibras ópticas de vidrio, por este motivo se está presentando este trabajo, el cual se presenta un dispositivo microposicionador XYZ, el cual se está optimizando para el mejoramiento en las aplicaciones tales como, el alineamiento y acoplamiento de señales ópticas láser a fibras ópticas de vidrio para telecomunicaciones y para fibras ópticas de vidrios especiales, como son las fibras fluoradas dopadas con tierras raras. El dispositivo consiste de tres platinas, y cada una de ellas cuenta con un motor con caja de engranes con una relación de 131.25:1 y un encoder óptico incremental; los cuales proporcionan información del desplazamiento de cada uno de los ejes XYZ, y todo el dispositivo tiene una base que se sujeta a una placa base fija. Cada motor cuenta con un driver de potencia tipo puente H para su accionamiento el cual puede ser controlado mediante una tarjeta de adquisición de datos y control de National Instrument myRIO, la cual es controlada por medio de una PC, por medio un software desarrollado en LabVIEW. Actualmente solo se tienen los datos de los cálculos realizados en el modelo. Al realizar un poco de aritmética y de acuerdo a la especificación del motor, así como la especificación de fabricación de un tornillo de potencia, por cada grado de rotación del eje del motor representa un desplazamiento lineal del tornillo de 6,72 nm. De acuerdo a las pruebas preliminares utilizando el software, se repiten las posiciones que se han llevado a cabo.

Palabras clave: Microposicionamiento, acoplamiento, fibras ópticas de vidrio, láser.

1. Introducción

A partir de 1950 las fibras ópticas de vidrio fueron de interés para los científicos. En 1952, el físico Narinder Singh Kapany, apoyándose en los estudios de John Tyndall, realizó experimentos que condujeron a la invención de la fibra óptica de vidrio. Poco después de 1970, Panish y Hayashi, de los laboratorios Bell, mostraron un láser de semiconductores que podía funcionar continuamente a temperatura ambiente. En 1978 ya se transmitía a 10 Gb km/s. Además, John MacChesney y sus colaboradores, también de los laboratorios Bell, desarrollaron independientemente métodos de preparación de fibras ópticas de vidrio.

Debido a las investigaciones en el campo de los láseres y a la era de las telecomunicaciones por medio de fibras ópticas de vidrio (FOVs), ya que se estuvo utilizando cables de cobre, los cuales presentan grandes pérdidas en las comunicaciones, así como muy ineficientes en las mismas, ya que para tener una gran cantidad de comunicaciones era necesario el instalar cables de hasta 1024 pares de cables de cobre, presentando demasiado volumen en las tuberías de instalaciones, estos cables tan gruesos se pueden sustituir por un par de FOVs, teniendo gran eficiencia en la transmisión



de información, con pérdidas de hasta 0,2 dB/km, y mencionando esto, fue necesario el poder alinear y acoplar señales ópticas como son fuentes de luz blanca y láseres a los extremos de FOVs en los laboratorios, con el fin de evaluarlas en su conducción de las señales ópticas, las cuales llevan montadas grandes cantidades de información, entre ellas: voz, video y datos.

Y para poder realizar la alineación y el acoplamiento de éstas señales ópticas a las FOVs se requiere de equipos mecánicos con alta resolución, y dentro de estos equipos que actualmente se comercializan existen mesas XYZ analógicas con actuadores que están basados en tornillos vernier, con una resolución en el orden de los micrómetros, que en gran medida funcionan en los laboratorios de fibras ópticas, y también se comercializan mesas XYZ automatizadas con una resolución más alta, el inconveniente de estos equipos es su gran costo. Cuando los requerimientos son de mayor resolución se cuenta con dispositivos microposicionadores que están basados en piezoeléctricos [1-5], que su resolución es del orden de menos de 10 nm, sus limitaciones son el alcance de sus desplazamientos, que están en unas decenas de micrómetros y sus costos son aún más elevados. Además se ha diseñado y fabricado un dispositivo microposicionador en base a un sistema de bisagras, las cuales proporcionan su micromovimiento a partir de que esas se flexionan [6]. También se ha estudiado un mecanismo que su área de trabajo está un plano en XY, el cual fue manejado directamente por dos motores lineales y la cinemática de los ejes X y Y fue desacoplados por un mecanismo basado en unas bisagras flexibles y precargada por un resorte o muelle [7], este dispositivo tiene alcances de desplazamiento de entre -25 mm a 25 mm, y está diseñado para trabajos de maquinados en manufactura.

En el caso donde se requiere contar con alineaciones y acoplamientos de estas señales ópticas a las FOVs es necesario tener un desplazamiento de al menos 5 mm en un eje, y por supuesto que sean económicos, ya que por poner un ejemplo las mesas posicionadoras XYZ que una empresa vende, tienen costos de entre 4500 USD y 5200 USD, y las platinas de un solo eje automatizadas que tienen un alcance en desplazamiento de 100 mm a 150 mm con una resolución de 0,3 μm , tienen costos que van desde los 4000 USD hasta los 6500 USD, no contando con los impuestos.

Estos dispositivos microposicionadores son ampliamente utilizados en las áreas del conocimiento como son: la óptica, la medicina, la mecatrónica; y en la industria como son: la mecánica, la aeronáutica, la electrónica; por lo que es indispensable el contar con ellos.

Específicamente en las actividades de investigación sobre fibras ópticas y láseres son muy usados estos dispositivos microposicionadores XYZ, con el fin de realizar alineaciones y acoplamientos de altas resoluciones (en el orden de algunas decenas de nanómetros) de las señales ópticas (por ejemplo, láseres) a fibras ópticas de vidrio, con el fin de que se puedan llevar a cabo estas actividades a realizar, ya que los diámetros de los núcleos de las FOVs para telecomunicaciones utilizadas van desde los 6 μm hasta aproximadamente los 8 μm , y para las fibras de vidrios especiales dopadas con tierras raras como el tulio, holmio, erbio, etc., algunas de estas fibras tienen diámetro de aproximadamente 3 μm .

Debido a los inconvenientes antes mencionados hemos propuesto el diseño, manufactura, ensamble y evaluación de un dispositivo microposicionador XYZ, con motores, los cuales tienen cajas de engranes, encoders; y un tornillo de 80 cuerdas por pulgada, este se utiliza con el fin de aumentar la resolución de cada uno de sus ejes, controlados con una tarjeta National Instrument myRIO, por medio de un software en LabVIEW desarrollado para su manipulación, el cual, tiene arquitectura configurable ya que emplea dispositivos programables en campo (FPGA), además, este dispositivo tiene la capacidad de expansión para colocarle más ejes, de acuerdo a nuestros requerimientos y necesidades.

En este momento el proyecto se encuentra en etapa de validación, y una de las grandes ventajas del dispositivo es que se están abatiendo los costos, contando con una gran flexibilidad en su operación, que hasta el momento ha cumplido nuestros requerimientos, otra de las ventajas es el



que está siendo utilizado en el proceso de enseñanza-aprendizaje en asignaturas de licenciatura como manufactura, automatización y robótica.

2. Diseño del dispositivo microposicionador

De acuerdo a los requerimiento para poder alinear y acoplar señales ópticas a fibras ópticas de vidrio utilizadas en telecomunicaciones, las cuales tienen un diámetro de núcleo que está entre los 3 μm y los 8 μm , por lo que es necesario contar con un dispositivo microposicionador XYZ, el cual tuviese una resolución por revolución de al menos una décima parte del valor del diámetro del núcleo de la FOV.

Se diseñó, fabricó y probó un tornillo con su tuerca, con un paso de 80 cuerdas por pulgada, y con estas especificaciones y un poco de aritmética, al dar una revolución el tornillo se habrá desplazado linealmente una distancia de 0,3175 mm y al utilizar un motor con caja de engranes con una relación de 131,25:1, ahora cada revolución del eje del motor representará un desplazamiento lineal de 0,00241905 mm o 2,419 μm , por lo que cada grado que gira el eje del motor representa un desplazamiento en el eje del tornillo de 6,71958 nm.

2.1 Metodología

Se muestra un diagrama de bloques de la metodología llevada a cabo de las actividades para el diseño, mecanizado, manufactura, ensamble y evaluaciones del dispositivo microposicionador XYZ, el cual primero se realizó para una platina, y esta representa el movimiento en un eje, después se repitió el mismo proceso para los otros dos ejes, como se muestra en la Figura 1.

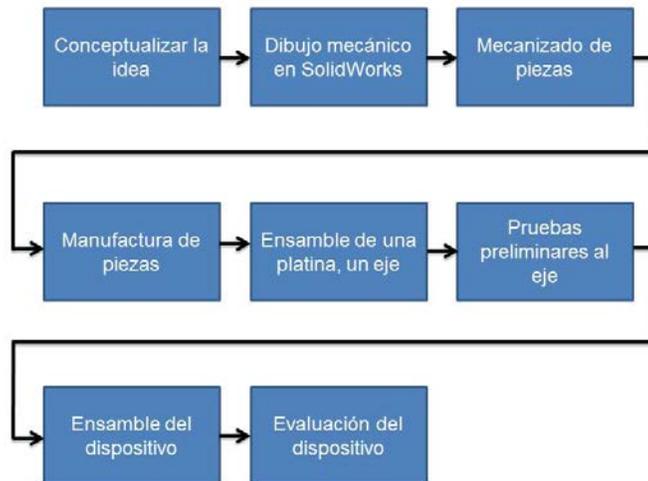


Figura 1. Diagrama de la metodología para llevar a cabo las actividades de fabricación del dispositivo.

2.2 Dibujos en SolidWorks de los ejes y del dispositivo XYZ completo

A continuación se muestran los, diseños de la platina en un solo eje (Figura 2), en la cual se muestra la platina sin ningún desplazamiento, la Figura 3 muestra la misma platina con un desplazamiento, cada una de las platinas está diseñada para que alcance un desplazamiento máximo de 25 mm, distancia suficiente para nuestros propósitos, y la Figura 4 presenta el dispositivo

XYZ completamente ensamblado con los motores, en la Figura 4 (a) se muestra el dispositivo en modelo de SolidWorks y en la Figura 4 (b) se presenta el dispositivo ya fabricado y ensamblado.

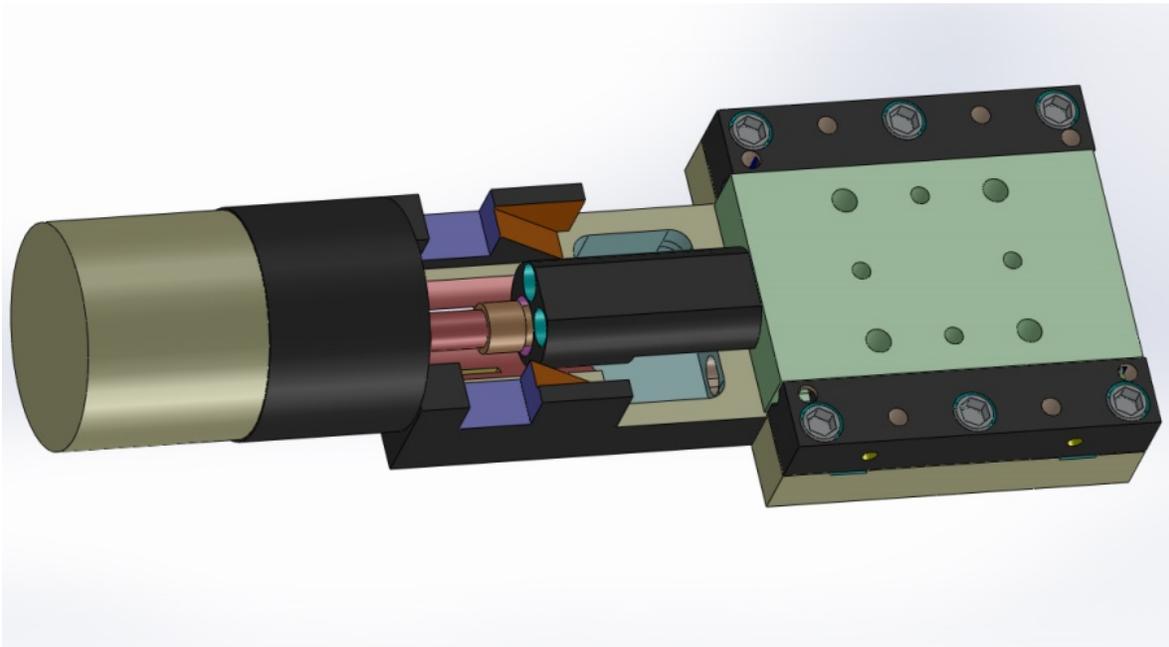


Figura 2. Platina con desplazamiento en un solo eje, sin mostrar desplazamiento.

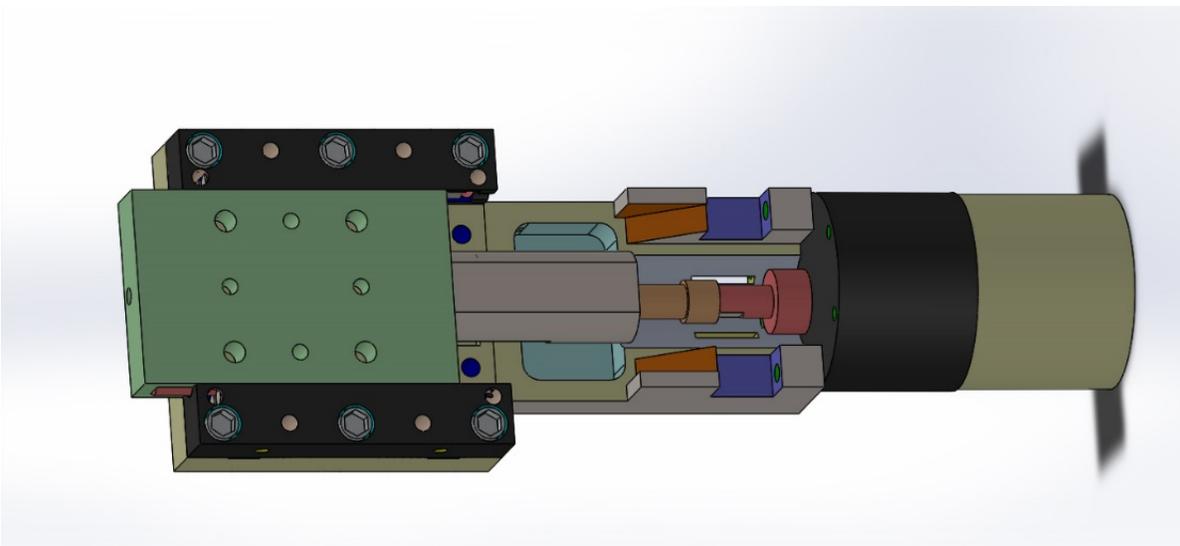


Figura 3. Platina con desplazamiento en un solo eje, mostrando desplazamiento.

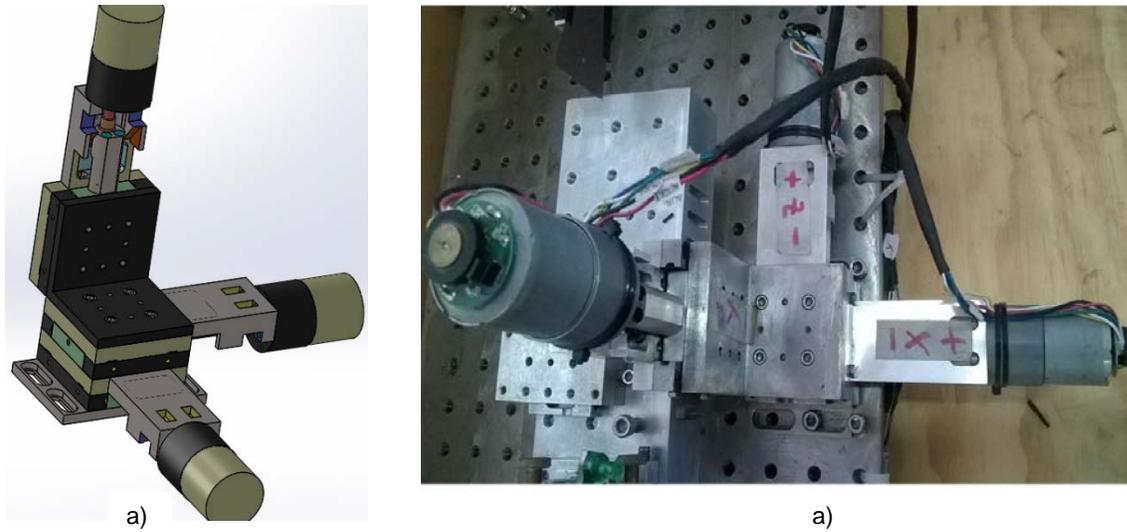


Figura 4. Dispositivo microposicionador XYZ, a) modelo en SolidWorks y b) fabricado y ensamblado.

Los procesos de maquinado se realizaron en tres centros de mecanizado, en uno de marca Sunmill, en otro de marca Haas y en un tercero que es un Dyna Myte, en la Figura 5 se muestra al último centro de maquinado, maquinando una pieza.



Figura 5. Centro de maquinado realizando la fabricación de una pieza.

2.3 Materiales para la construcción del dispositivo XYZ

La selección de los materiales para la fabricación del dispositivo es muy importante, esto implica el cómo planear las actividades de su fabricación y buscar que tipo de herramientas son las



más adecuadas para llevar a cabo su ejecución, optimizar al máximo los costos de este dispositivo y fundamentalmente que cumpla con los requerimientos de funcionalidad.

A continuación se describe una lista de los materiales utilizados en construcción de este dispositivo.

1. Acero inoxidable.
2. Acero al carbón.
3. Aluminio.
4. Latón.
5. Pernos Dowell.
6. Balines.
7. Resortes.
8. Motores de corriente directa con caja de engranes a 131.25:1.
9. Tornillos comerciales de acero inoxidable.

2.4 Etapas de electrónica y control para el dispositivo microposicionador XYZ

Las etapas de electrónica y control para manipular el dispositivo microposicionador XYZ, no se abordan en detalle en este trabajo por lo que se describen de manera general para comprender como se relaciona con la estructura mecánica del alineador de FOVs. El sistema electrónico permite captar información del desplazamiento y generar señales de control para movimiento controlado de los ejes XYZ, como primera etapa se considera la evaluación del sistema mecánico para determinar la repetibilidad, exactitud y precisión de los desplazamientos del dispositivo microposicionador. En la Figura 6 se muestra un diagrama de bloques, el cual describe el objetivo final el dispositivo, con su etapa de control, que actúa sobre la etapa electrónica, y ésta a su vez sobre los motores, y estos son los que realizan los movimientos de los ejes.

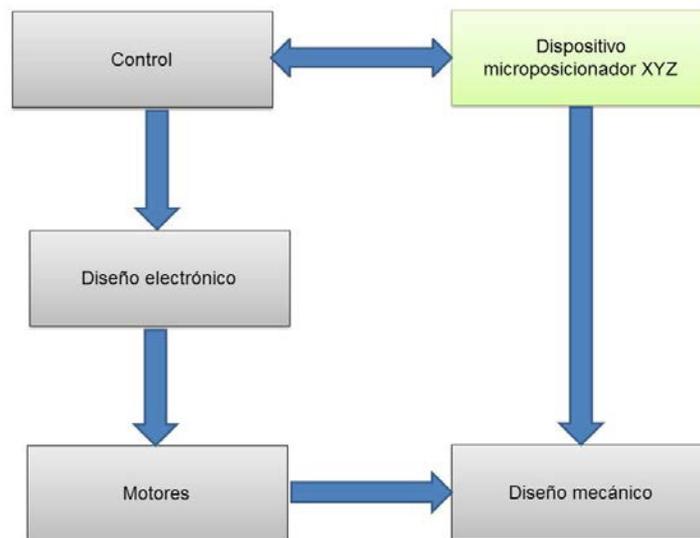


Figura 6. Diagrama de bloques del desarrollo del dispositivo microposicionador XYZ incluyendo todas sus etapas.

Se llevarán a cabo evaluaciones preliminares de los motores, así como de sus encoders y eje de desplazamiento, por lo que al momento de tener armado el dispositivo microposicionador, re llevará a cabo la evaluación en sus tres ejes.



A continuación se presenta un diagrama de la utilización del dispositivo microposicionador en la aplicación de alineación y acoplamiento de una señal láser a una FOV, incluyendo las etapas de potencia, etapa de monitoreo y la etapa de control (Figura 7).

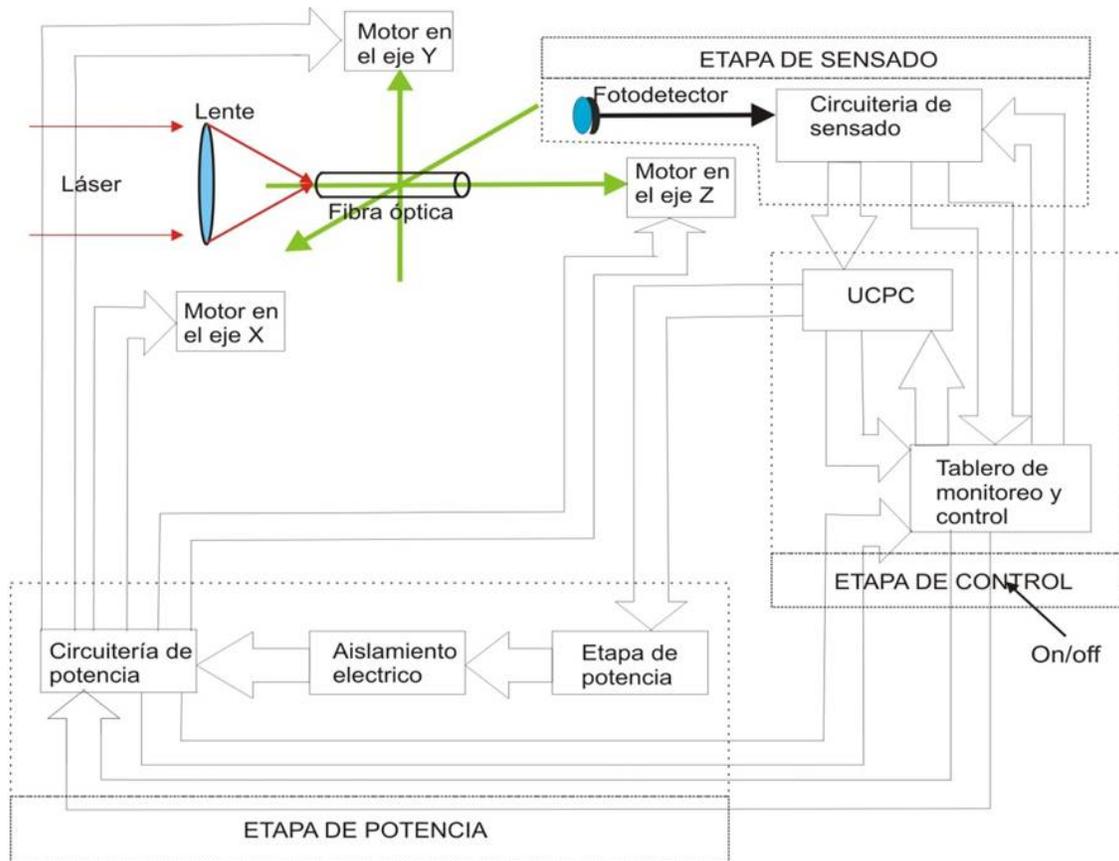


Figura 7. Diagrama de la aplicación del dispositivo microposicionador XYZ en la alineación y acoplamiento de un láser a una FOV.

Este dispositivo microposicionador podrá emplearse como una alternativa a las mesas posicionadoras XYZ comerciales como la que se muestra en la Figura 8, que cuenta con actuadores Vernier, y en esta se le han realizado modificaciones adaptándole tres motores a pasos, pero el inconveniente de utilizar estos motores es que cada paso representa un desplazamiento de aproximadamente $1,0 \mu\text{m}$, por lo que en dos pasos el desplazamiento transversal al eje de la fibra, la posicionará en el centro del diámetro de su núcleo, el cual coincidirá con el centro de la cintura del haz láser y con dos pasos más estará fuera del alineamiento con su núcleo, este mesa XYZ ha formado parte de un arreglo experimental en el que se ha alineado y acoplado una señal láser (Stocks Raman multilíneas a 1117 nm y a 1175 nm) a una fibra óptica de vidrio especial, ZBLAN: Tm^{3+} , (Fluoruro de zirconio, fluoruro de bario, fluoruro de lantano, fluoruro de aluminio y fluoruro de sodio, y en su núcleo está dopado con tulio) en la cual se puede observar fluorescencia en la ventana del azul a aproximadamente 480 nm .

Debido a las complicaciones de llevar a cabo estas alineaciones para acoplar la señal láser y mantener así por varios minutos en la FOV bajo estudio, realizadas al manipular manualmente las perillas, haciendo girando los actuadores Vernier que controlan los desplazamientos de los ejes, esto nos ha inspirado y conducido para llevar a cabo éste proyecto, en la Figura 9 se muestra un experimento en donde se está generando oscilación láser utilizando como medio activo una fibra

óptica de ZBLAN dopada con tulio (Tm^{3+}) con 2000 ppm y bombeándola con un láser Raman multilíneas a 1117 nm y a 1175 nm [8], en donde se ha utilizado una mesa posicionadora XYZ.

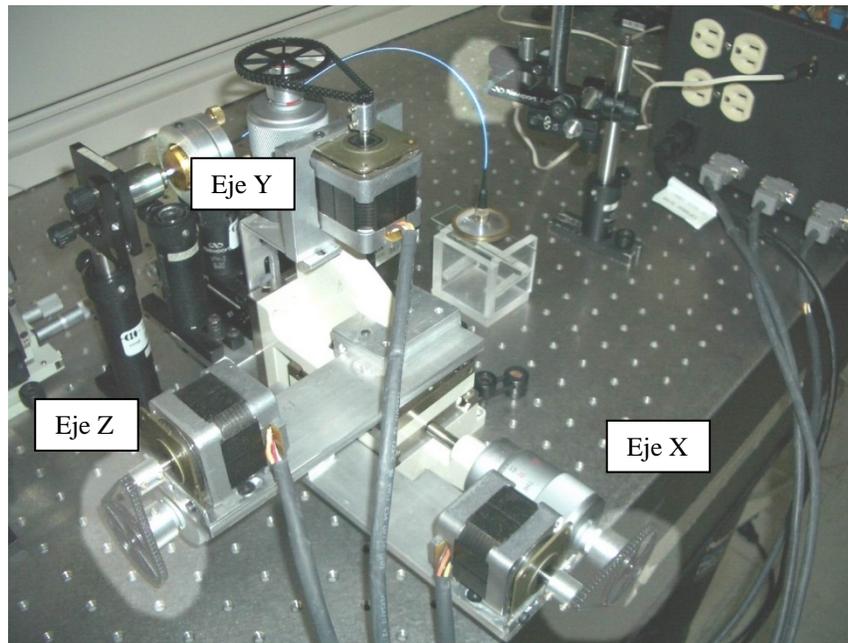


Figura 8. Experimentos con una mesa posicionadora XYZ modificada con motores a pasos y con electrónica para su semiautomatización.

Al estar evaluando fibras de vidrios especiales como la que se muestra en la Figura 10, se requiere de un dispositivo microposicionador XYZ automatizado, con el fin de que mantenga su alineación y acoplamiento por decenas de minutos, para que dé tiempo para toma de resultados y sus repeticiones.

3. Resultados

Se dibujó el modelo del dispositivo microposicionador XYZ en el software de CAD, el que se ha utilizado ha sido el SolidWorks, y se obtuvieron los dibujos a detalle, de los cuales se obtuvieron las dimensiones para realizar la mecanización de cada una de las piezas que conforman este dispositivo, posteriormente se fabricaron cada una de ellas y se empezaron a ensamblar, al terminar esta actividad se iniciaron las pruebas preliminares de deslizamiento, la cantidad de backlash y de longitud para cada eje y posteriormente se ensambló completamente el dispositivo XYZ.

La resolución del desplazamiento fue calculado de acuerdo a las especificaciones del motor y de la fabricación del tornillo, mencionadas anteriormente, y es de aproximadamente 7 nm en el tornillo, esto es, por cada grado que gira el rotor del motor, y conforme a esos resultados se está realizando un plan para evaluar y comprobar físicamente estos datos.

Al llevar a cabo estas pruebas preliminares se han obtenido las ganancias para los motores, las cuales ya se incluyeron en el software desarrollado, con el fin de que se lleve a cabo su lazo de control de los mismos. En la Figura 11 muestra el dispositivo microposicionador XYZ, el cual ya se está probando y evaluando.

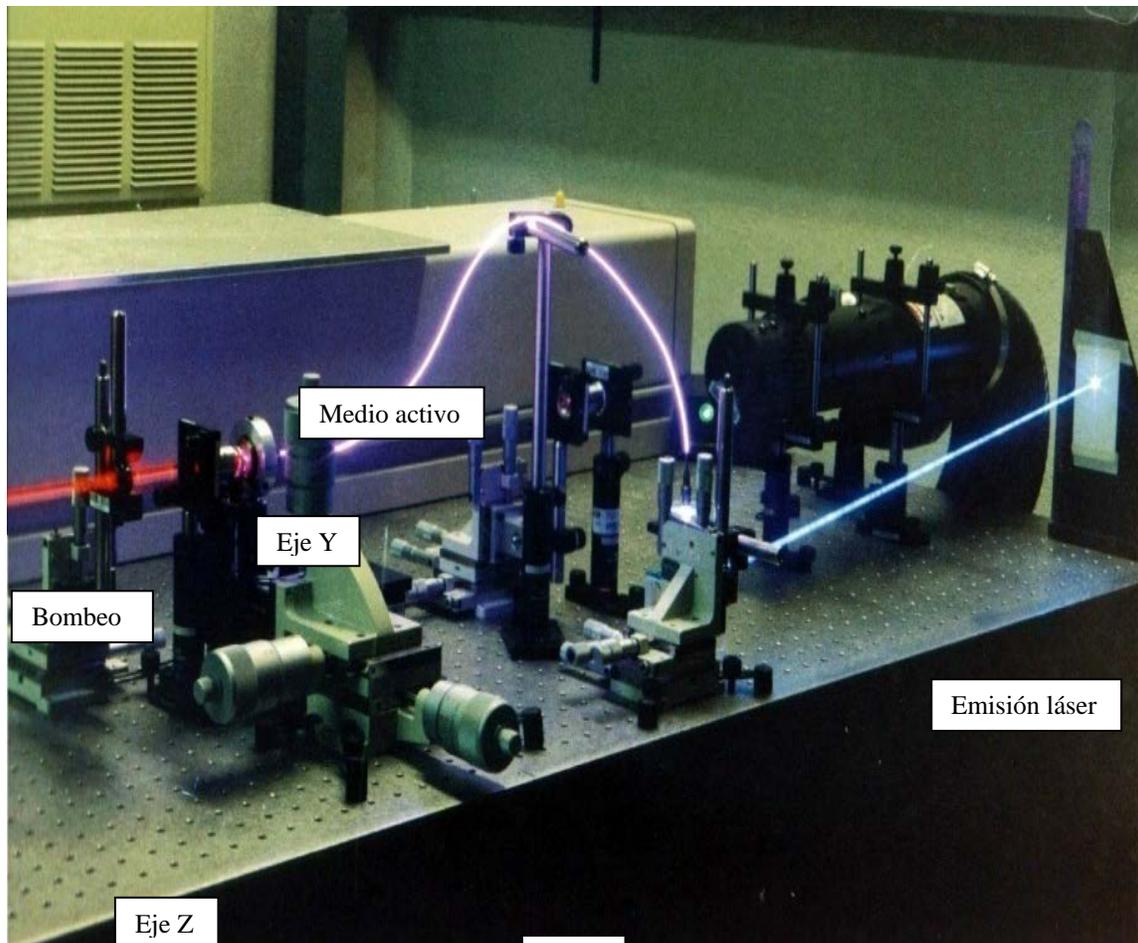


Figura 9. Arreglo experimental que se muestra el uso de una mesa de posicionamiento XYZ y se está generando emisión láser.

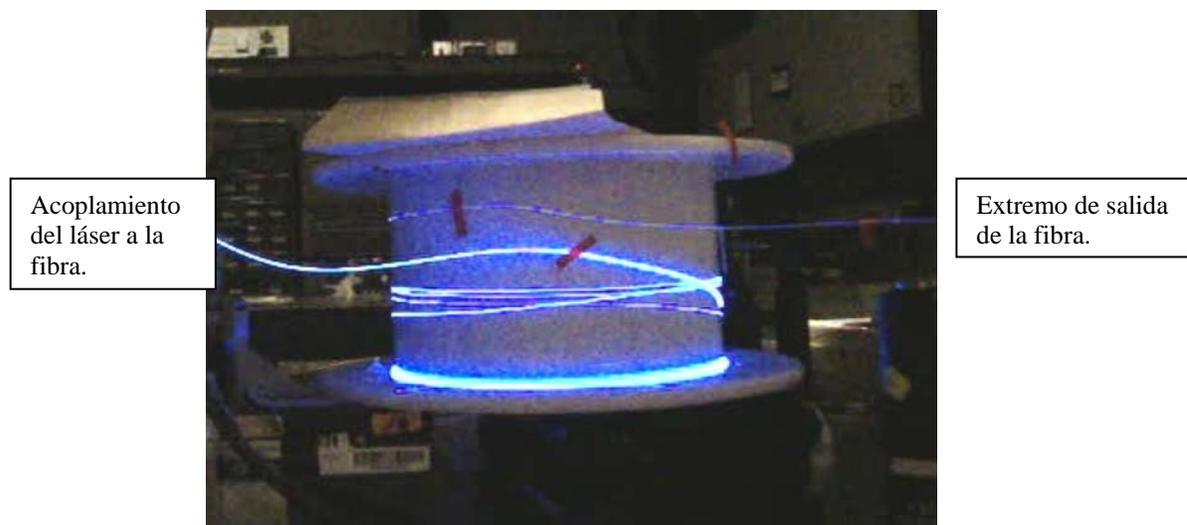


Figura 10. Arreglo experimental, donde se está evaluando una fibra óptica de ZBLAN:Tm³⁺, la cual presenta fluorescencia.

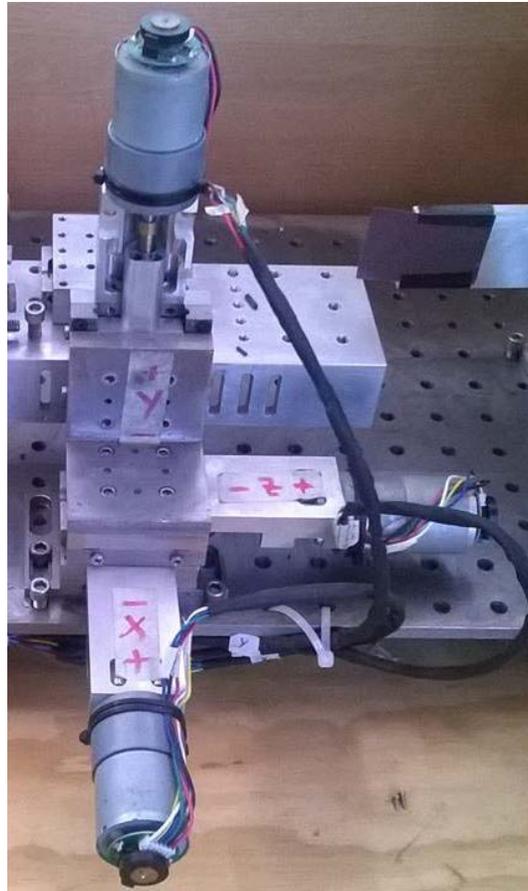


Figura 11. Dispositivo microposicionador XYZ, que ya se está evaluando.

El deslizamiento de este dispositivo presenta una fricción más alta que las mesas posicionadoras XYZ con actuadores vernier, ya que éste está conformado por pernos dowell, deslizándose unos sobre otros, por ende presenta fricción, ya que no tiene ningún elemento en este sistema que gire y reduzca la resistencia en su desplazamiento.

3.1 Tablas

Es de gran importancia el realizar una tabla comparativa entre cuatro tipos de dispositivos microposicionadores XYZ, con el fin de encontrar ventajas competitivas del modelo que se está proponiendo en este trabajo, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Tabla comparativa de 4 tipos de dispositivos microposicionadores XYZ.

Dispositivos microposicionadores XYZ	Costo	Alcance del Desplazamiento (mm)	Resolución
Análogos (con vernier)	Medianamente alto	25	1 μm
Con control automático	Alto	25	$\leq 1 \mu\text{m}$
Con piezoeléctricos	Muy alto	0,2	$\leq 6 \text{ nm}$
Dispositivo propuesto	Bajo	≥ 25	$\sim 7 \text{ nm}$

4. Conclusiones



Se ha diseñado y modelado el dispositivo microposicionador XYZ en el software SolidWorks, además se han realizado unos cálculos para saber la relación que hay entre la rotación del eje del motor y el desplazamiento en el tornillo, lo que hemos obtenido algebraicamente que por cada grado que rota el eje del motor se logra un desplazamiento de aproximadamente 7 nm.

Se han realizado algunas pruebas preliminares utilizando el software desarrollado para manipular manualmente los motores de los ejes de este dispositivo y se han obtenido

Este dispositivo microposicionador se planea colocarlo en un dispositivo que autoalíne, autoacople y mantenga estas dos actividades en una señal láser a una fibra óptica de vidrio para telecomunicaciones.

El deslizamiento de este dispositivo microposicionador XYZ está basado en pernos dowell, deslizándose unos sobre otros, por lo que presentan fricción, y como los motores tienen un torque alto la fricción no es una limitante y una versión siguiente de este prototipo se fabricará considerando guías lineales cruzadas en acero inoxidable, con esta modificación al diseño de este dispositivo mejorará significativamente su desempeño respecto a la fricción.

Este dispositivo se planea utilizarlo en otras áreas de investigaciones, como son: en óptica, medicina, mecatrónica y electrónica.

Referencias

- [1] D. Zhang, D. G. Chetwynd, X. Liu, Y. Tian. "Investigation of a 3-DOF micro-positioning table for surface grinding". *International Journal of Mechanical Sciences*. Vol. 48, pp. 1401-1408, 2006.
- [2] Qingsong Xu and Yangmin Li. "Design of a New Decoupled XYZ compliant Parallel Micropositioning Stage with Compact Structure". *Proceedings of the IEEE*. pp. 901-906, 2009.
- [3] Yangmin Li and Qingsong Xu. "A totally Decoupled Piezo-Driven XYZ Flexure parallel Micropositioning Stage for Micro/Nanomanipulation", *IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATION SCIENCE AND ENGINEERING*. Vol. 8, No. 2, pp. 265-279, APRIL 2011.
- [4] Qingsong Xu and Yangmin Li. "Optimal Design and Fabrication of a Piezoactuated Flexure XYZ Parallel Micropositioning Stage". *The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Vol. 10, pp. 3682-3687, October 18-22. 2010.
- [5] Hashimah Ismail, Norlela Ishak, Mazidah Tajjudin, Mohd Hezri Fazalul Rahiman, Ramli Adnan. "Positioning and Tracking Control of an XY Table". *2011 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*. pp. 343-347, 2011.
- [6] Xiantao Sun, Weihai Chen, Rui Zhou, Jianbin Zhang and Wenjie Chen. "Design and Analysis of a New Flexure-based XY Micropositioning Stage with Decoupled Motion Characteristic". *Proceeding of the 2012 IEEE International Conference of Robotics and Biomimetics*. Pp. 1011 – 1016, December 11-12, 2012.
- [7] Fujun Wang, Cunman Liang, Yanling Tian, Xingyu Zhao and Dawei Zhang. "A Flexure-based Kinematically Decoupled Micropositioning Stage with a Centimeter Range Dedicated to Micro/Nano Manufacturing". *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*. Vol. 21, No. 2, pp.1055 – 1062, April 2016.
- [8] D. V. Talavera and E. B. Mejía. "Blue up-conversion Tm^{3+} -doped fiber laser pumped by a multiline Raman source". *Journal of Applied Physics*. Vol. 97, pp. 053102-1 a 053102-4, 2005.



Brazo robótico de 3 grados de libertad asistido por visión artificial para sistemas teleoperados

Julio Cesar Robles, Rodrigo Oliver Delgado Arcega, Fabio A. Gómez Becerra,
Gonzalo Curiel Olivares.

Instituto Tecnológico Superior de Puerto Vallarta.

Resumen

En el presente proyecto se realizó el estudio y desarrollo de un prototipo de brazo robótico de 3 gdl. asistido con visión artificial esto permite detectar un objeto de forma o color previamente especificado por el usuario, una vez detectado el objeto que se desea manipular, el robot podrá ir automáticamente hacia el objeto para sostenerlo evitando así las dificultades que lleva el control del robot en movimientos más precisos, una vez tomado el objeto el usuario tendrá el control total del robot nuevamente, además el robot mostrara información del entorno por medio de sensores, toda la manipulación y monitoreo del robot se hará por medio de un panel de control en una interfaz gráfica que estará a disposición del usuario. Todo el control automático es respaldado por el análisis del modelo matemático y con la aplicación de un controlador para las trayectorias del robot.

Palabras clave: Robot, teleoperado, Interface, cinemática, usuario, LabVIEW

1. Introducción

La robótica en los últimos años ha logrado un lugar importante en la industria moderna, siendo actualmente los robots industriales, herramientas imprescindibles para el funcionamiento y progreso de muchas industrias.

Los brazos robóticos teleoperados son robots utilizados en trabajos de localización remota, tareas difíciles de automatizar y en entornos no estructurados; estos sistemas constan generalmente de un control manual y un sistema de visión, todo el control se hace por medio de un ordenador.

El empleo de sistemas de visión artificial en la manipulación controlada sensorialmente permite, por un lado, resolver problemas de conocimiento del ambiente, precisión, costo y fiabilidad y por otro lado, permite a los robots industriales evolucionar en ambientes variables [1].

En este contexto, se mencionan que un Sistema de visión artificial debe realizar las siguientes funciones [2]:

- Reconocimiento de piezas o conjuntos, así como sus posiciones de equilibrio.
- Determinación de la posición y orientación de piezas con relación a una referencia base.
- Extracción y ubicación de rasgos significativos de las piezas, con objeto de establecer servomecanismos visuales que permitan su manipulación robotizada.
- Inspección en línea y verificación de que el proceso ha sido realizado satisfactoriamente (control de calidad sin contacto).

Gabriel Borja en su trabajo Prototipo de robot manipulador a través de visión artificial, nos muestra en su trabajo las cuatro principales fases de la visión artificial [3]:



- La primera fase, que es puramente sensorial, consiste en la captura o adquisición de las imágenes digitales mediante algún tipo de sensor.
- La segunda etapa consiste en el tratamiento digital de las imágenes, con objeto de facilitar las etapas posteriores. En esta etapa de procesamiento previo es donde, mediante filtros y transformaciones geométricas, se eliminan partes indeseables de la imagen o se realzan partes interesantes de la misma.
- La siguiente fase se conoce como segmentación, y consiste en aislar los elementos que interesan de una escena para comprenderla
- Por último se llega a la etapa de reconocimiento o clasificación. En ella se pretende distinguir los objetos segmentados, gracias al análisis de ciertas características que se establecen previamente para diferenciarlos.

Este proyecto propone una alternativa más amigable al usuario para la manipulación del robot, que consta de una combinación del control manual y el control automático, conservando la versatilidad que el control manual ofrece y el control preciso de la visión artificial cuando se desee sujetar algún objeto.

2. Diseño y construcción del brazo robótico en CAD

El diseño del brazo robótico de 3 grados de libertad se tomó la geometría y configuración de un brazo antropomórfico (Figura 1) formado por una base y dos eslabones.

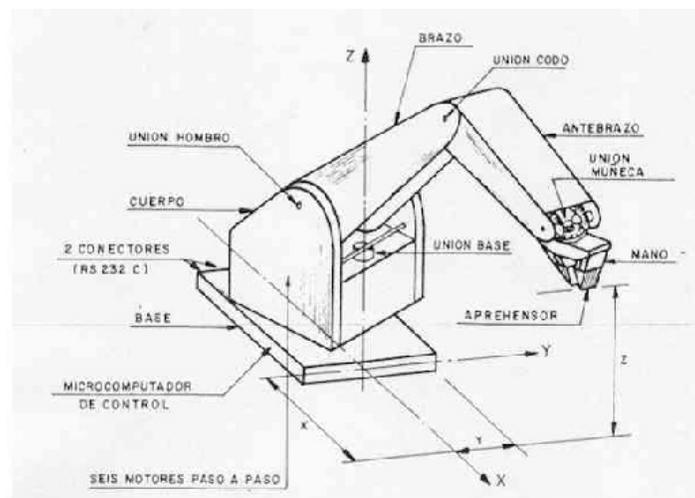


Figura 1. Brazo antropomórfico.

Las articulaciones, las cuales permiten el movimiento del robot tienen una configuración de articulación rotacional (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

El prototipo en su base (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) tiene una altura de 9 cm ya que está montado sobre una base donde se alojará una estructura para soportarlo (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y también servirá para alojar los componentes electrónicos y de control del brazo robótico.

El primer eslabón del robot (antebrazo) tiene dimensiones de 30 cm de largo de eje a eje, 8.7 cm de ancho y 2 plg. de profundidad, el segundo eslabón del robot tiene dimensiones de 20 cm de largo, 7.5 cm de ancho y 2 plg. de profundidad. El acoplamiento entre los motores y los eslabones



es de accionamiento directo en el que el eje del actuador se acopla directamente a la carga o la articulación que va a mover, sin la utilización de un reductor intermedio.

Tipos de Articulaciones

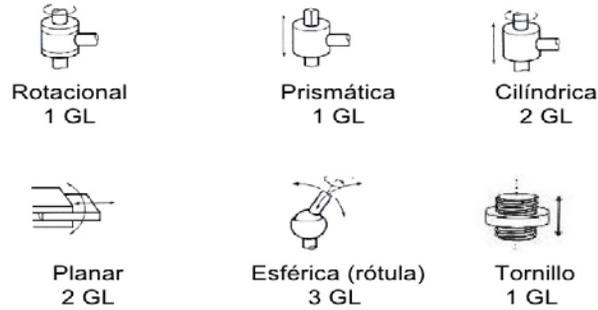


Figura 2. Tipos de articulaciones.

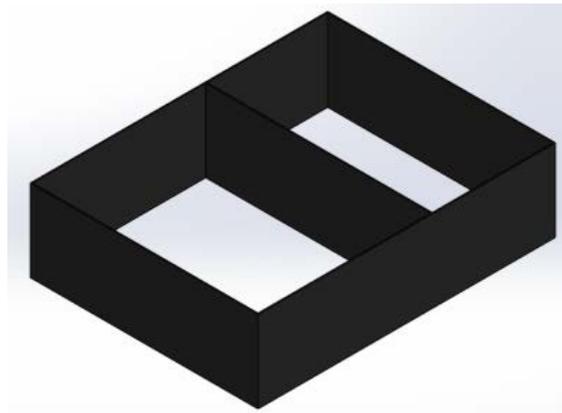


Figura 3. Base.

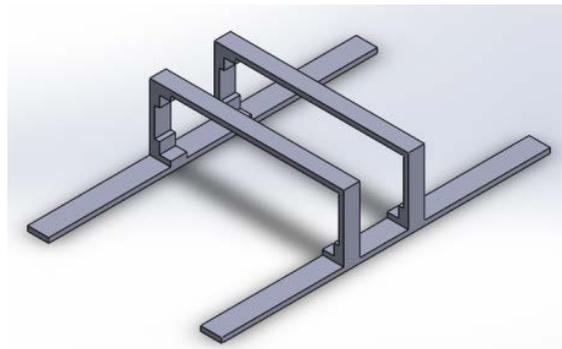


Figura 4. Soporte brazo.

Se le colocó en el último eslabón del robot, una pinza para darle una estética de su utilidad (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

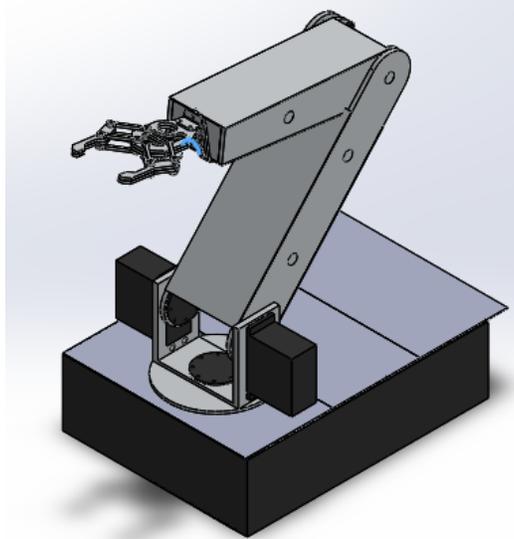


Figura 5. Vista isométrica brazo robótico.

2.1 Hardware

Servomotores

Los servomotores son un tipo especial de motor que se caracterizan por su capacidad para posicionarse de forma inmediata en cualquier posición dentro de su rango de operación. Los servos seleccionados para el control del brazo fueron los servomotores SM-s8457M con un torque de 40 kg-cm y una alimentación a 7.4V y el servomotor MG995 de 15 kg-cm y una alimentación a 5V.

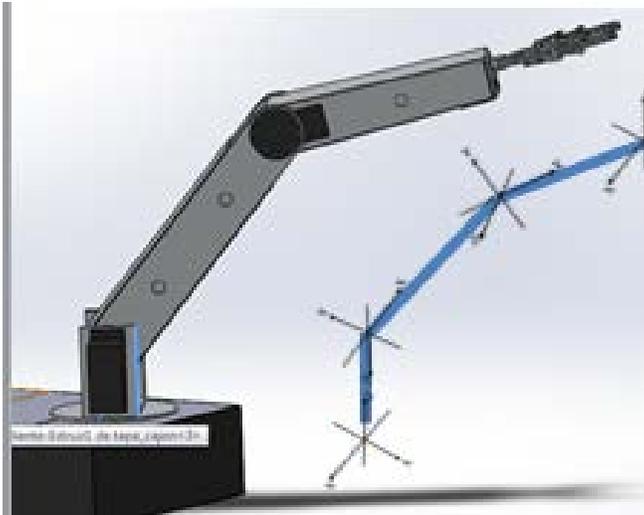
Tarjeta controladora NI myRIO, cuenta con un procesador ARM® Cortex™-A9 dual-core en tiempo real, 10 entradas analógicas, 6 salidas analógicas; 40 líneas E/S digital, conexión Wi-fi, LEDs, push-button, acelerómetro interno. La webcam utilizada para este proyecto tiene calidad de imágenes de 5 pixeles en fotografías y VGA en video.

2.2 Modelo cinemático

La cinemática del robot estudia el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia. Así, la cinemática se interesa por la descripción analítica del movimiento espacial del robot como una función del tiempo, y en particular por las relaciones entre la posición y la orientación del extremo final del robot, Figura 6, con los valores que toman sus coordenadas articulares. [4]

Existen dos problemas fundamentales a resolver en la cinemática del robot; el primero de ellos se conoce como el problema cinemático directo, y consiste en determinar cuál es la posición y orientación del extremo final del robot, con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia, conocidos los valores de las articulación y los parámetros geométricos de los elementos del robot; el segundo denominado problema cinemático inverso, resuelve la configuración que debe adoptar el robot para una posición y orientación del extremo conocidas. [5]

Según la representación de Denavit-Hartenberg, escogiendo adecuadamente los sistemas de coordenadas asociados a cada eslabón por medio de los parámetros de Denavit-Hartenberg.



Q	θ	d	a	A
1	Θ_1	l_0	0	90°
2	Θ_2	0	l_1	0
3	Θ_3	0	l_2	0

Figura 6. Parámetros Denavit-Hartenberg.

Los parámetros de Denavit-Hartenberg se utilizarán para definir las matrices de transformaciones homogéneas para cada eslabón respecto al sistema de coordenadas anterior definidas según la siguiente matriz:

$$A_{i-1}^i = \text{rot}(z, \theta_i) \times \text{tras}(0,0, d_i) \times \text{tras}(a_i, 0,0) \times \text{rot}(x, \alpha_i) \quad (17)$$

Una vez definidas las matrices de transformaciones homogéneas de cada eslabón se puede calcular la matriz T que indica la localización del sistema final con respecto al sistema de referencia de la base del robot.

$$T = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Aplicando las identidades:

$$T = \begin{bmatrix} C_1 C_{23} & -C_1 S_{23} & S_1 & C_1 (l_2 C_{23} + l_1 C_2) \\ S_1 C_{23} & -S_1 S_{23} & -C_1 & S_1 (l_2 C_{23} + l_1 C_2) \\ S_{23} & C_{23} & 0 & l_2 S_{23} + l_1 S_2 + l_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Usando resolución de problemas cinemático inverso por métodos geométricos, se encontraron números de relaciones geométricas en las que intervendrán las coordenadas del extremo del robot, sus coordenadas articulares y las dimensiones físicas de sus elementos.

La Figura 7 Muestra la configuración del robot. El dato de partida son las coordenadas (px ,py ,pz) referidas a {S0} en las que se quiere posicionar su extremo. Como se ve, este robot posee una estructura plana, quedando este plano definido por el ángulo de la primera variable articular q1. El valor de q1 se obtiene de manera inmediata como:



$$q_1 = \tan^{-1}\left(\frac{P_y}{P_x}\right) \quad (4)$$

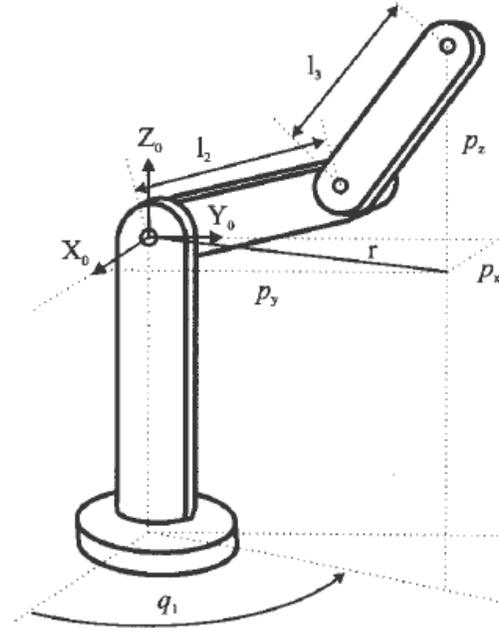


Figura 7. Robot articular.

Considerando ahora únicamente los elementos 2 y 3 que están situados en un plano y utilizando el teorema del coseno, se tendrá:

$$r^2 = P_x^2 + P_y^2 \quad (5)$$

$$r^2 + P_z^2 = l_2^2 + l_3^2 + 2l_2l_3 \cos q_3 \quad (6)$$

$$\cos q_3 = \frac{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3} \quad (7)$$

Como se ve, existen 2 posibles soluciones para q_3 según se tome el signo positivo o negativo en la raíz. Estas corresponden a las configuraciones de codo arriba y codo abajo del robot.

El cálculo de q_2 se hace a partir de la diferencia entre β y α :

$$q_2 = \beta - \alpha \quad (8)$$

Siendo:

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{P_z}{r}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{P_z}{\pm\sqrt{P_x^2 + P_y^2}}\right) \quad (9)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{l_3 \sin q_3}{l_2 + l_3 \cos q_3}\right) \quad (10)$$



Luego, finalmente

$$q_2 = \tan^{-1} \left(\frac{P_z}{\pm \sqrt{P_x^2 + P_y^2}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{l_3 \sin q_3}{l_2 + l_3 \cos q_3} \right) \quad (11)$$

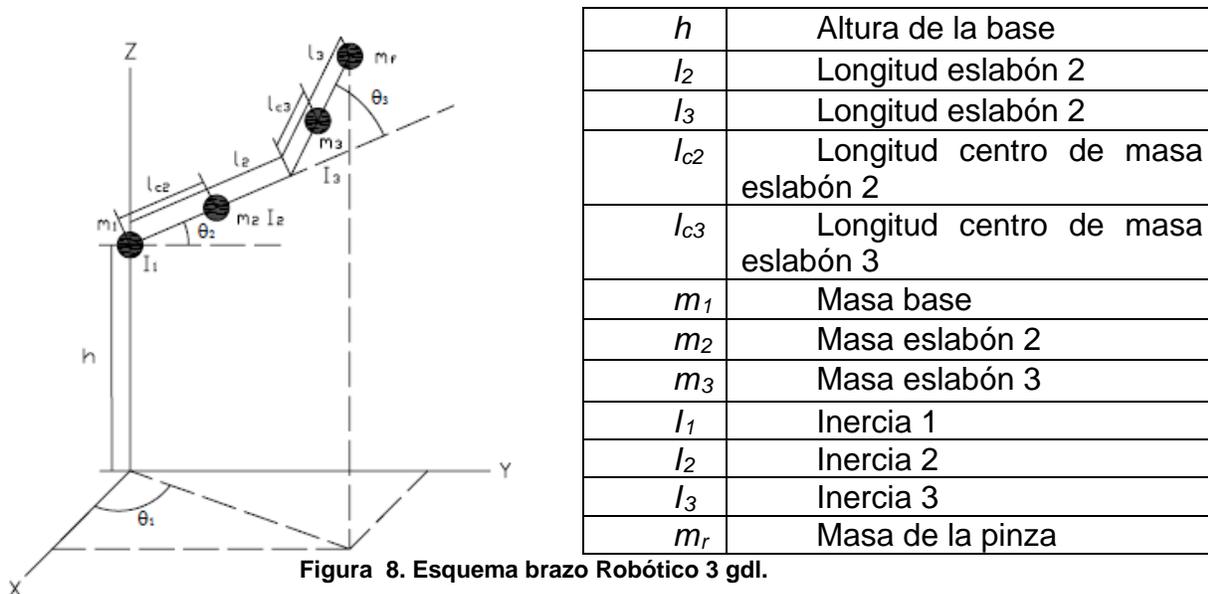
De nuevo los dos posibles valores del signo dan lugar a dos valores diferentes para q_2 correspondientes a las configuraciones codo arriba y abajo.

2.3 Modelo dinámico de un robot mediante la formulación Lagrange-Euler

El uso de las ecuaciones de LaGrange para el modelado dinámico de manipuladores se reduce a cuatro etapas para cada grado de libertad que tenga el robot:

1. Cálculo de la energía cinética: $K(q(t), \dot{q}(t))$.
2. Cálculo de la energía potencial: $U(q(t))$.
3. Cálculo del lagrangiano: $L(q(t), \dot{q}(t))$.
4. Desarrollo de las ecuaciones de LaGrange.

En la siguiente Figura 8 se muestran las relaciones de los movimientos y las coordenadas articulares que nos ayudaran en la obtención de las ecuaciones de la energía cinética y la energía potencial [5].



A continuación se van a obtener las ecuaciones de las energías cinéticas y potenciales para cada uno de los eslabones del robot manipulador:

Eslabón 1:

Energía Cinética. $K_1 = \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 \quad (12)$

Energía Potencial. $U_1 = m_1 g h \quad (13)$

Eslabón 2



$$\text{Energía Cinética} \quad K_2 = \frac{1}{2}m_2v_2^2 + \frac{1}{2}I_2(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) \quad (14)$$

Se requiere obtener la expresión de velocidad, para ello se sabe que:

$$v_2^2 = \dot{X}_2^2 + \dot{Y}_2^2 + \dot{Z}_2^2 \quad (15)$$

$$X_2 = l_{c2} \cos \theta_2 \cos \theta_1 \quad (16)$$

$$Y_2 = l_{c2} \cos \theta_2 \sin \theta_1 \quad (17)$$

$$Z_2 = h + l_{c2} \sin \theta_2 \quad (18)$$

Derivando con respecto al tiempo cada una de las coordenadas anteriores:
Desarrollando y reduciendo con la identidad $\cos^2 \theta + \sin^2 \theta = 1$:

$$v_2^2 = l_{c2}^2 \dot{\theta}_2^2 + l_{c2} \cos^2 \theta_2 \dot{\theta}_1^2 \quad (19)$$

Con lo que la ecuación de la energía cinética es:

$$K_2 = \frac{1}{2}m_2[l_{c2}^2 \dot{\theta}_2^2 + l_{c2} \cos^2 \theta_2 \dot{\theta}_1^2] + \frac{1}{2}I_2(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) \quad (20)$$

$$\text{Energía Potencial.} \quad U_2 = m_2g(h + l_{c2} \sin \theta_2) \quad (21)$$

Eslabón 3:

$$\text{Energía Cinética.} \quad K_3 = \frac{1}{2}m_3v_3^2 + \frac{1}{2}I_3[\dot{\theta}_1^2 + (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2] \quad (22)$$

$$\text{Energía Potencial.} \quad U_3 = m_3g(h + l_2 \sin \theta_2 + l_{c3} \sin(\theta_2 + \theta_3)) \quad (23)$$

Masa del Efecto Final

$$\text{Energía cinética} \quad K_4 = \frac{1}{2}m_f v_4^2 \quad (24)$$

Para obtener la velocidad

$$v_4^2 = \dot{X}_4^2 + \dot{Y}_4^2 + \dot{Z}_4^2 \quad (24)$$

$$X_4 = l_2 \cos \theta_2 \cos \theta_1 + l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_1 \quad (25)$$

$$Y_4 = l_2 \cos \theta_2 \sin \theta_1 + l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_1 \quad (26)$$

$$Z_4 = h + l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \quad (27)$$

Con lo que la ecuación de la energía cinética es:



$$\begin{aligned}
K_4 = & \frac{1}{2}m_f l_3^2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2}m_f l_3^2 \dot{\theta}_3^2 + m_f l_2 l_3 \cos \theta_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}m_f l_2^2 \dot{\theta}_2^2 \\
& + \frac{1}{2}m_f l_{c3}^2 \cos^2(\theta_2 + \theta_3) \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}m_f l_2^2 \cos^2 \theta_2 \dot{\theta}_1^2 \\
& + m_f l_2 l_3 \cos \theta_3 \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)
\end{aligned} \quad (28)$$

$$\text{Energía Potencial.} \quad U_4 = m_f g (h + l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3)) \quad (29)$$

Después de obtener las expresiones de las energías cinética y potencial de cada uno de los eslabones del robot manipulador. Se debe obtener la energía cinética total del robot manipulador. [6]

$$K = K_1 + K_2 + K_3 + K_4 \quad (30)$$

La energía potencial total del robot manipulador es:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 \quad (31)$$

El Lagrangiano del sistema es:

$$\begin{aligned}
L = & \frac{1}{2}I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}m_2 [l_{c2}^2 \dot{\theta}_2^2 + l_{c2} \cos^2 \theta_2 \dot{\theta}_1^2] + \frac{1}{2}I_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) + \\
& \frac{1}{2}m_3 l_{c3}^2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2}m_3 l_{c3}^2 \dot{\theta}_3^2 + m_3 l_2 l_{c3} \cos \theta_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}m_3 l_2^2 \dot{\theta}_2^2 + \\
& \frac{1}{2}m_3 l_{c3}^2 \cos^2(\theta_2 + \theta_3) \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}m_3 l_2^2 \cos^2 \theta_2 \dot{\theta}_1^2 + m_3 l_2 l_{c3} \cos \theta_3 \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \\
& \dot{\theta}_3) + \frac{1}{2}I_3 [\dot{\theta}_1^2 + (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2] + \frac{1}{2}m_f l_3^2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2}m_f l_3^2 \dot{\theta}_3^2 + \\
& m_f l_2 l_3 \cos \theta_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}m_f l_2^2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2}m_f l_3^2 \cos^2(\theta_2 + \theta_3) \dot{\theta}_1^2 + \\
& \frac{1}{2}m_f l_2^2 \cos^2 \theta_2 \dot{\theta}_1^2 + m_f l_2 l_3 \cos \theta_3 \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) - m_1 g h - m_2 g (h + \\
& l_{c2} \sin \theta_2) - m_3 g (h + l_2 \sin \theta_2 + l_{c3} \sin(\theta_2 + \theta_3)) - m_f g (h + l_2 \sin \theta_2 + \\
& l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3))
\end{aligned} \quad (32)$$

2.4 Linealización del modelo dinámico

El modelo dinámico se linealizó en la posición de 0° en donde la función Sen w = w y la función Cos w = 1, ver Figura 9.

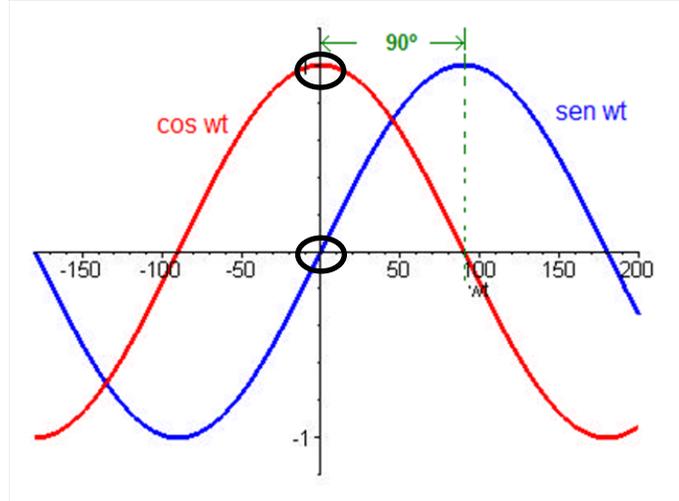


Figura 9. Funciones seno y coseno.

Una vez linealizado se obtienen las siguientes ecuaciones reducidas del modelo dinámico con las cuales se puede proceder a diseñar un controlador para el sistema.

$$\begin{aligned}
 I_1 + I_2 + I_3 + m_2 l_{22}^2 + 2m_3 l_2 l_{33} + m_3 l_{33}^2 + m_3 l_2^2 + 2m_f l_2 l_3 + m_f l_3^2 + m_f l_2^2 (dd\theta_1) &= U_1 \quad (33) \\
 \{m_2 l_{22}^2 + I_2 + m_3 l_{33}^2 + m_3 l_2^2 + 2m_3 l_2 l_{33} + m_f l_3^2 + I_3 + 2m_f l_2 l_3 + m_f l_2^2\} (dd\theta_2) + & \\
 \{m_3 l_{33}^2 + m_3 l_2 l_{33} + I_3 + m_f l_3^2 + m_f l_2 l_3\} (dd\theta_3) + (m_2 l_{22} + m_3 l_{33} + m_3 l_2 + m_f l_2 + m_f l_3) & \quad (34)
 \end{aligned}$$

2.5 Diseño del controlador por planitud diferencial

El modelo dinámico quedaría expresado en su forma matricial:

$$Kc = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{1}{a_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{a_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{a_2} + 2\frac{b}{a_2} a_3 & -\frac{b}{a_2} a_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{a_2} + \frac{a_3}{a_2} b_2 & -\frac{a_3}{a_2} b_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_2 & b_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & b_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (35)$$

Ya calculada la matriz de controlabilidad del sistema se procede a la elección de los índices de Kronecker para considerar la siguiente matriz de controlabilidad de rango completo. Verificando que su determinante sea diferente de cero, el sistema es controlable y diferencialmente plano. A partir de la nueva matriz de controlabilidad Kc se puede encontrar la salida plana del sistema que viene dada como [7]. Realizando la multiplicación de matrices se encontró que la salida plana del sistema es:

$$F = \begin{bmatrix} a_1 x_1 \\ a_2 \frac{x_3}{2a_3 b_2 + 1} + a_3 \frac{x_5}{2a_3 b_2 + 1} \\ -a_2 b_2 \frac{x_3}{b_1 + 2b_1 a_3 b_2} + x_5 \frac{a_3 b_2 + 1}{b_1 + 2b_1 a_3 b_2} \end{bmatrix} \quad (36)$$



Antes de proceder a diseñar el controlador para el brazo robótico se hacen todos los cambios de variables con los siguientes valores de un brazo Robótico de tres grados de libertad hecho en CENIDET (referencia) en los que se somete a prueba todo el planteamiento del modelo dinámico del brazo robótico y el diseño del control lo cual solo sujetaría al brazo robótico a la validación de sus parámetros físicos [8].

h	0 cm
l_2	22 cm
l_3	22 cm
l_{c2}	5.2 cm
l_{c3}	13.76 cm
m_1	0 kg
m_2	1 kg
m_3	2.2483 kg
I_1	0.04624 kg*m ²
I_2	0.03616 kg*m ²
I_3	0.025495 kg*m ²
m_r	1 kg

Una vez sustituidos todos los valores en las ecuaciones la salida plana del sistema es:

$$F = \begin{bmatrix} 4811.4x_1 \\ 675.88x_3 + 291.38x_5 \\ -223.39x_3 + 127.79x_1 \end{bmatrix} \quad (37)$$

Teniendo la salida plana en valores numéricos se procede a diseñar un control para cada entrada del sistema; esto se hace por medio de las derivadas de la salida plana y las sustituciones necesarias como se muestra:

Controlador 1

$$F1 = 4811.5 * (x1 - 0.3) \quad (38)$$

Controlador 2

$$F2 = 675.88 * (x3 - 3.14) + 291.38 * (x5 - 0.6) \quad (39)$$

Controlador 3

$$F3 = -223.39 * (x3 - 3.14) + 127.79 * (x5 - 0.6) \quad (40)$$

Para encontrar las ganancias del para los controladores se utiliza el polinomio de Routh-Hurwitz de segundo orden, donde la sintonización es:

$$wn = 10 \quad (41)$$

$$phi = 0.707 \quad (42)$$

2.6 Diseño de la interfaz robot-usuario en labview

Al ser la tarjeta NI MyRio desarrollada por national instruments el software de desarrollo dedicado para esta tarjeta es labview. Como puede verse en la imagen de la Figura 10, la interfaz



gráfica para el control del brazo robótico es muy amigable para el usuario ya que no tiene ningún grado de dificultad para el control de esta.

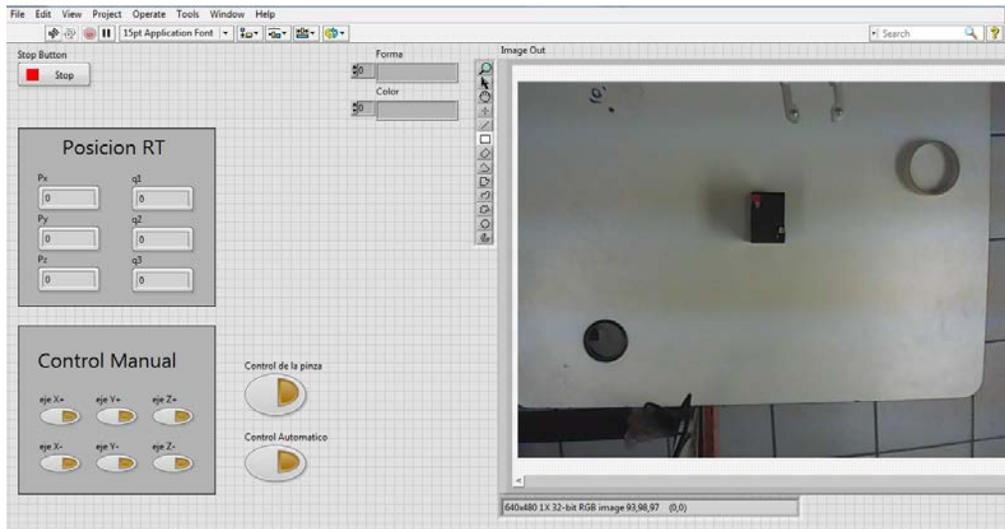


Figura 10. Interfaz grafica.

La interfaz gráfica cuenta con un control manual sobre los ejes x, y, z del espacio de trabajo del robot, también proporciona los datos de las coordenadas x, y, z y los valores de que deben tomar las articulaciones; una vez detectado el objeto deseado como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, es posible presionar el botón de control automático para que el robot se posicione en las coordenadas donde el objeto se encuentra y así poder presionar el botón del control de la pinza para sujetar o tomar objetos.

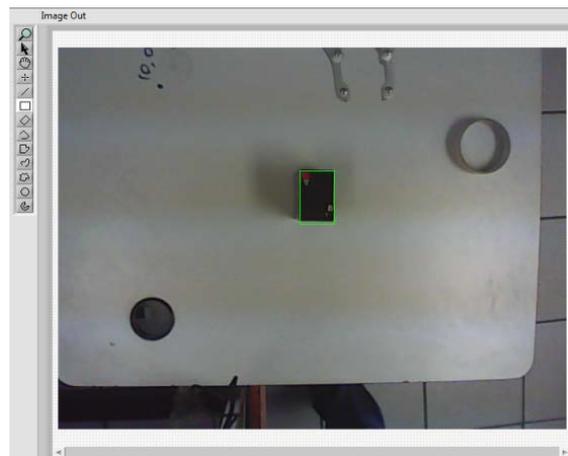


Figura 11. Detección de objetos.

El software que hace posible el control del brazo robótico está conformado por tres partes principales la primera es el control de las posiciones x, y, z del espacio de trabajo como se muestra en la Figura 12 .

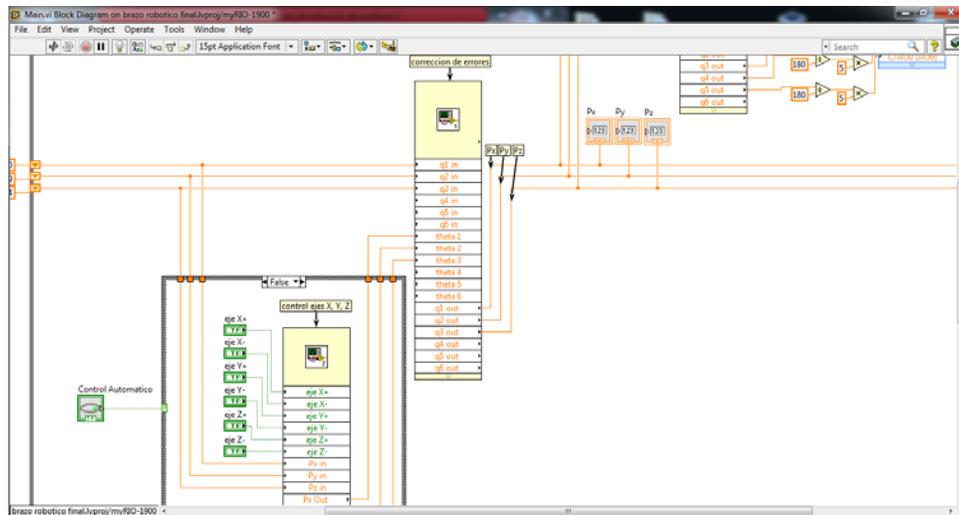


Figura 12. Programa parte 1.

La segunda parte del código es la encargada de adquirir las imágenes y procesarlas para localizar y reconocer la forma y el color del objeto de prueba, Figura 13.

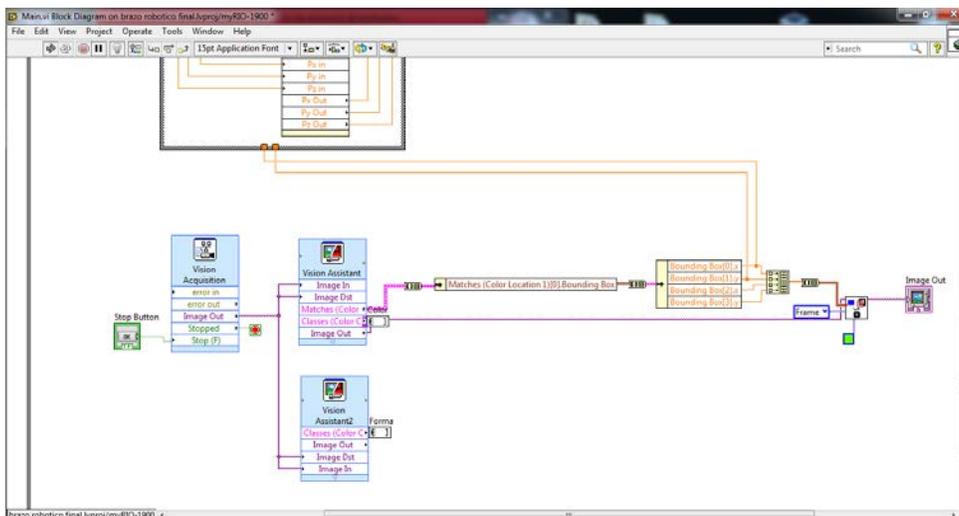


Figura 13. Programa parte 2.

La tercera parte del código se encarga de interpretar las posiciones x, y, z por medio de la cinemática inversa para poder mandar la señal a los servomotores antes de mandar la señal a las salidas primero debe de monitorearse que siempre trabajen en su rango los servomotores que es de 0° a 180° por medio del saturador y posteriormente es adecuada para la salida.

3. Resultados

Una vez terminado la construcción del robot, el modelado matemático y el diseño del software para el control del robot se procedió a la realización de pruebas para asegurar el buen funcionamiento del modelo cinemático, el modelo dinámico y el controlador utilizado para este proyecto.



La primera prueba realizada tiene como objetivo observar la respuesta que tiene el modelo cinemático ante la entrada de coordenadas x , y , z propuestas por la cámara al localizar el objeto de prueba en el espacio de trabajo del robot.

Al meter las coordenadas en las que se encuentra el objeto en este caso las coordenadas (0, 28.26, 5.34) en el modelo cinemático se observan los valores arrojados para la configuración de los servomotores donde la base tomaría una configuración de 90° , el hombro de 57° y el codo de 83° como se observa en la Figura 14, también se puede observar gráficamente la configuración del robot en el lado izquierdo.

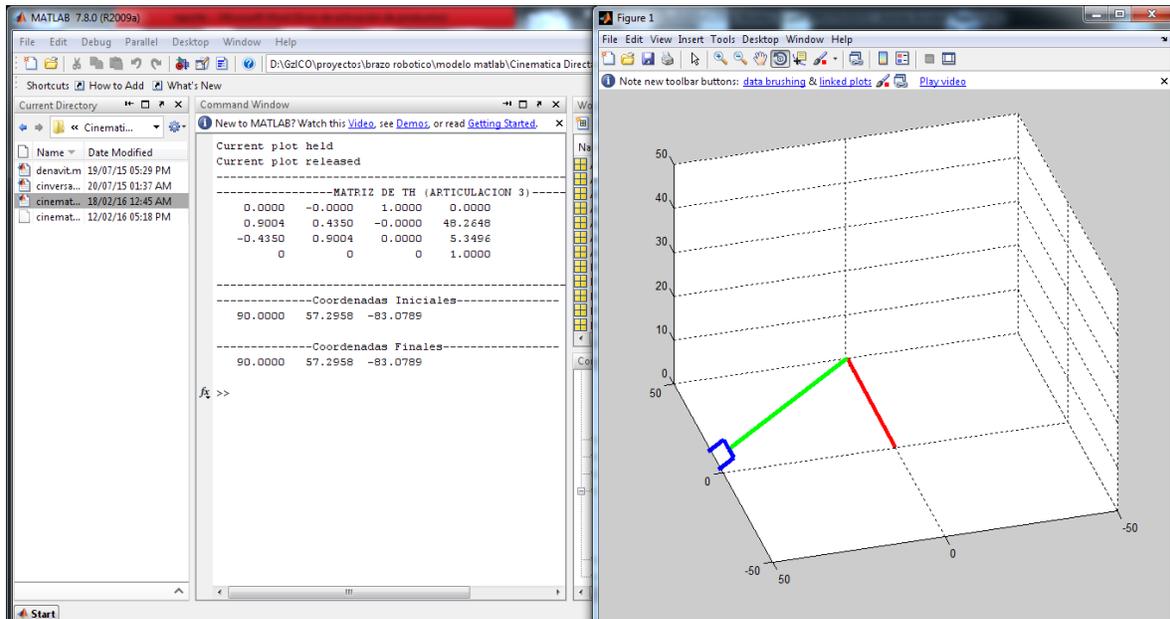


Figura 14. Prueba 1.

Al realizar una segunda prueba en las posiciones (30, 37.80, 5.34) el cálculo de la cinemática arroja los siguientes resultados para los servomotores, en la base 51° en el hombro 57° y en el codo 83° como se muestra en la Figura 15.

Con esto se concluye que el modelo cinemático arroja como resultado las configuraciones correctas que deben adoptar los servomotores en el brazo robótico para llevarlo en la posición deseada en este caso la posición del objeto de prueba.

La segunda prueba realizada en el brazo robótico tiene como objetivo observar que el controlador lleve efectivamente al brazo robótico a las posiciones deseadas que se probaron en el modelo cinemático, esta prueba además verificara que el modelo dinámico este correctamente planteado y el controlador correctamente diseñado.

En la posición (0, 28.26, 5.34) se puede observar como el control lleva asintóticamente de la posición inicial del robot a la posición deseada. (Figura 16)

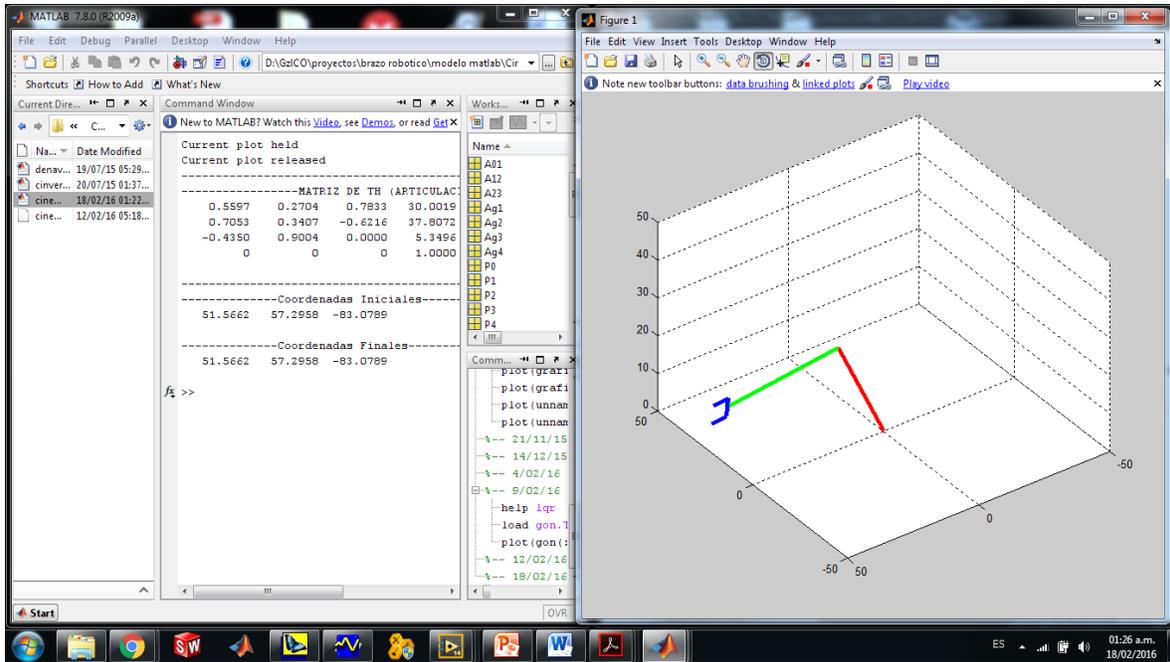


Figura 15. Prueba 2.

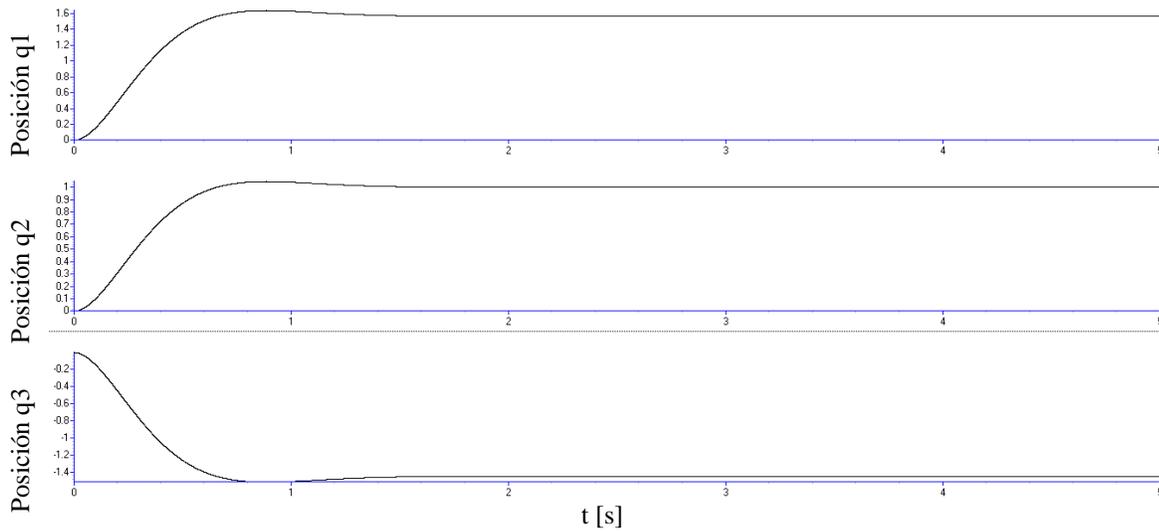


Figura 16. Prueba 1 Controlador.

En la posición (30, 37.80, 5.34) se puede observar como el control lleva asintóticamente de la posición inicial del robot a la posición deseada. (Figura 17).

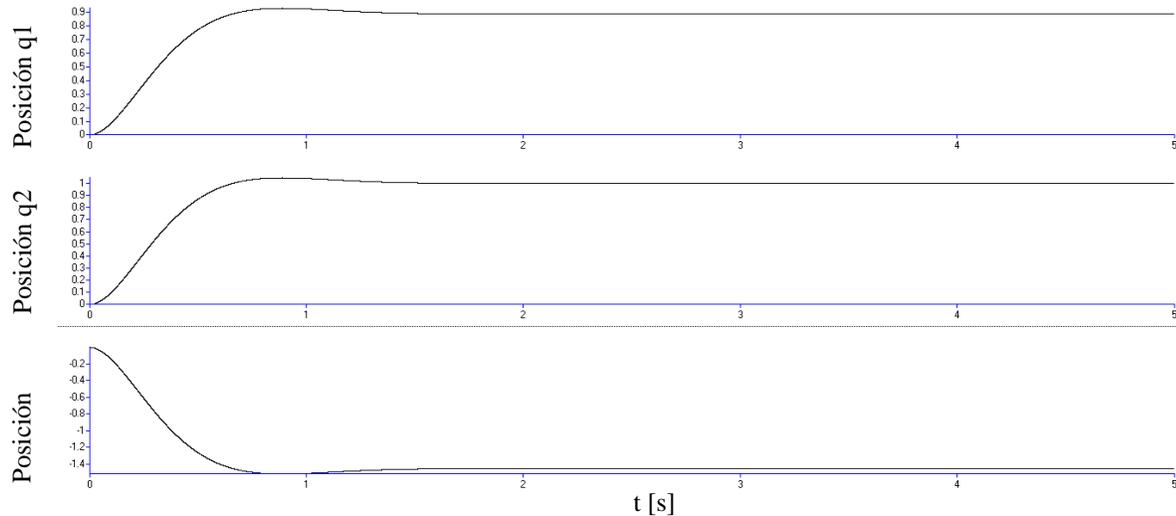


Figura 17. Prueba 2 controlado

4. Conclusiones

Con los resultados obtenidos se puede concluir que los modelos matemáticos como lo son el modelo cinemático, el modelo dinámico y el diseño del control presentes en este trabajo están correctamente planteados lo que significa que siempre que haya un sistema que pueda adquirir las posiciones x , y , z de un objeto deseado en este caso por medio de la visión artificial el brazo robótico siempre adoptara de manera correcta las configuraciones de las articulaciones haciéndolo funcionar de manera automática cuando se deseé.

Se recomienda para trabajos a futuro considerar materiales más ligeros y de calidad para mejorar la estructura mecánica del robot, otra recomendación es utilizar técnicas de visión artificial más complejas que tengan acción de manera directa en el control del brazo robótico, realizar trayectorias definidas utilizando el espacio de trabajo completo, se propone implementar motores de cd de alta precisión.

Referencias

- [1] S. Saha, Introducción a la robótica, México: McGraw-Hill, 2010.
- [2] J. Rodríguez, Modelo cinemático y control de un brazo robótico imprimible, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2012.
- [3] R. Kelly y V. Santibañez, Robótica automática control de movimiento de robots manipuladores, Madrid: Pearson, 2003.
- [4] O. Katsuhiko, Ingeniería de control moderna, México: Prentice-hall, 1998.
- [5] J. Rementería, Teleoperación de un SCORBOT-ER 4u empleando un PAMCA, México D.F: Universidad Nacional Autónoma de México, 2011.
- [6] A. Barrientos, L. Peñín y C. Balaguer, Fundamentos de robótica, McGraw Hill, 1996.
- [7] N. Muñoz, A. Delgado y A. Díaz, «Diseño de un escenario "en línea" para robots teleoperados desde internet,» *Scientia et Technica Año XII*, pp. 85-90, 2010.
- [8] M. Gutiérrez, A. Celaya y I. López, «Construcción de un brazo robótico de cuatro grados de libertad (4GDL),» *Pistas Educativas*, pp. 1-11, 2014.



- [9] V. Aguilar, Diseño y construcción de un brazo robot de 6 grados de libertad con fines educativos para aplicaciones en nivel medio superior, México, D.F: Instituto Politecnico Nacional, 2011.
- [10] W. Quishpe y A. Salas, Diseño e implementación de un manipulador robótico para la plataforma móvil IROBOT CREATE teleoperado mediante el módulo MINICORE RCM5600W, Latacunga, Ecuador: Escuela Politécnica del Ejército, 2012.
- [11] P. Arévalo, Diseño, construcción y control de un robot industrial con arquitectura antropomórfica dotado con visión artificial, México, D.F: Instituto Politecnico Nacional, 2010.
- [12] J. Hoyos, Control visual basado en posición de un brazo robótico RV2AJ implementado en matlab y java, Guadalajara, México: Universidad de Guadalajara, CUCEI, 2011.
- [13] E. Sobrado, Sistema de visión artificial para el reconocimiento y manipulación de objetos utilizando un brazo robot, Lima: Pontificia universidad católica del Perú , 2009.
- [14] M. Bueno y M. Arteaga, «Control servoviusual de robots manipuladores: un enfoque hacia la industria,» *Épsilon*, pp. 9-31, 2012.
- [15] G. Borja, Prototipo de robot manipulador con visión artificial, UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL, 2012.



Generación de modelo dinámico de un robot paralelo diseñado mediante SolidWorks®

Francisco Guillermo^{1*} Salas Pérez, Marco Antonio Regalado Reyes¹, Julio César Morales Villa¹, Olga Lidia Luévano Cabrales¹, Ricardo Pavel Parada Morado¹, Gadi Suresh Kumar²

¹ Programa de Ingeniería en Tecnologías de Manufactura, Universidad Politécnica de Gómez Palacio

² Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Coahuila

*Autor por correspondencia: fsalas@upgop.edu.mx

Resumen

Los robots manipuladores paralelos son cadenas cinemáticas cerradas de interés en aplicaciones industriales recientes. Su modelo dinámico, necesario para simulaciones de control de movimiento, en general es difícil de obtener. En este artículo se presenta la obtención del modelo dinámico de un robot paralelo de dos grados de libertad. Se realiza el diseño y modelado del robot en SolidWorks®, que a continuación se importa en forma de modelo de Simulink®. El modelo obtenido se simula en un lazo cerrado de control de movimiento, para su validación. Se concluye que el método presentado es una opción aceptable para obtener el modelo dinámico para estudios de control de movimiento.

Palabras clave: Robot paralelo, SolidWorks®, Modelo dinámico.

1. Introducción

El uso de robots manipuladores paralelos en aplicaciones industriales como manipulación, empaquetado y maquinado, ha ido en aumento en años recientes [1]. Otras aplicaciones notables son en las áreas de investigación, como en simuladores de vuelo [2] y posicionamiento de telescopios [3]. Los robots paralelos están formados por dos o más cadenas cinemáticas, unidas entre sí en un extremo, y unidas por el otro extremo a una base fija. Esta estructura permite al mecanismo proporcionar una rigidez superior a la que presentan los robots seriales [4], los cuales están formados por una sola cadena cinemática. Además, el diseño de la estructura permite que los actuadores se ubiquen en la base fija del robot, por lo que no agregan masa a las partes móviles del manipulador. Adicionalmente, al aligerarse la carga sobre la estructura móvil del robot, es posible lograr velocidades muy altas en el elemento final [4].

El modelo dinámico de un manipulador relaciona las fuerzas o pares aplicados en las articulaciones con los desplazamientos que se obtienen, en términos de posiciones, velocidades y aceleraciones articulares. Los procedimientos analíticos para la obtención del modelo dinámico de robots son la formulación Lagrangiana, la formulación de Newton-Euler y la formulación por el principio del trabajo virtual [5]-[6]. En general, la complejidad de los modelos dinámicos de robots paralelos es mayor que la de los modelos dinámicos de los robots seriales, debido al acoplamiento físico entre las cadenas cinemáticas, representado matemáticamente con un conjunto de restricciones holonómicas, las cuales se suman a las fuerzas generalizadas aplicadas a los eslabones.

Por otro lado, algunos paquetes de software de diseño mecánico, como SolidWorks®, Catia y NX, cuentan con herramientas para realizar análisis cinemáticos y dinámicos de movimiento de los



mecanismos diseñados [7]-[9]. Adicionalmente, algunos paquetes de software de diseño mecánico proveen la capacidad de generar animación de los movimientos para facilitar el proceso de diseño.

El modelo dinámico de un robot es necesario para realizar simulaciones de algoritmos de control en lazo cerrado, en los que se busca caracterizar la respuesta dinámica del mecanismo [10], [11]. Además, en los procesos de diseño de robots, las animaciones de movimiento proporcionan información adicional sobre la respuesta del mecanismo, útil para realizar modificaciones al diseño del propio mecanismo o a los algoritmos de control.

La rapidez con la que se puede obtener un modelo dinámico mediante un software de diseño, además de la capacidad de generar animaciones de movimiento, puede ser una ventaja para el investigador y para el ingeniero de diseño, sobre la utilización de técnicas analíticas, cuando no es indispensable que el modelo sea analítico.

En este artículo se reporta el diseño de un manipulador paralelo planar, utilizando SolidWorks®, obteniéndose un modelo 3D. Dicho modelo se exporta a un software de análisis numérico, en el que se configura para producir un modelo dinámico, cuyas entradas sean consignas de par y cuyas salidas sea posiciones. Se realizan simulaciones de la aplicación de algoritmos de control en lazo cerrado al modelo dinámico. Adicionalmente, se genera la animación del movimiento del manipulador diseñado. Las principales contribuciones de este trabajo son las siguientes: 1. Mostrar el proceso de desarrollo y utilización de modelos dinámicos, a partir de la creación de un modelo 3D, mediante un paquete de software de diseño mecánico como SolidWorks® y un paquete de software cómputo científico como Simulink®. 2. Mostrar la generación automática de animaciones del movimiento generado. 3. Analizar la conveniencia de la utilización del proceso de desarrollo mencionado.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera: En la Sección 2 se presenta el manipulador diseñado. En la Sección 3 se presenta el proceso de creación del manipulador en SolidWorks®, así como la generación y exportación del modelo dinámico a Simulink®. En la Sección 4 se presentan las simulaciones de control de movimiento realizadas. Por último, se exponen algunas conclusiones. En este artículo se emplea la siguiente notación. Los vectores se representan con letras minúsculas en negrita y cursiva, mientras que las matrices se representan con letras mayúsculas en cursivas, y los escalares se representan con letras minúsculas en cursivas.

2. Diseño del manipulador

En la Figura 1 se muestra el diagrama cinemático del robot. Es un mecanismo de cinco barras con cinco articulaciones rotatorias, llamado también mecanismo paralelo 5R [6]. Consta de dos piernas, formada la primera con los eslabones indicados como los segmentos A_1B_1 , B_1P , y la segunda con los eslabones indicados como los segmentos A_2B_2 , B_2P . Las articulaciones A_1 y A_2 están unidas a la base fija del robot, y las articulaciones B_1 , B_2 , C_1 y P son móviles. La rotación del eslabón A_1B_1 alrededor del eje perpendicular al plano, respecto al eje x , se representa con la variable articular q_1 , mientras que la rotación del eslabón A_2B_2 alrededor del eje perpendicular al plano se representa con la variable articular q_2 . Las variables articulares β_1 y β_2 representan la rotación de los eslabones B_1P y B_2P , respectivamente. Las variables q_1 y q_2 son actuadas mientras que las variables β_1 y β_2 son no actuadas. Adicionalmente, se forma una estructura de doble paralelogramo, uno con los eslabones paralelos A_2B_2 y A_3C_1 , y otro con los eslabones paralelos B_2B_3 y C_2C_3 . Nótese que alrededor del eje perpendicular al plano, en la articulación B_2 , gira el eslabón no articulado $C_1B_2C_2$, y alrededor del eje perpendicular al plano, en la articulación P



, gira el eslabón C_3PB_3 . Estos paralelogramos tienen la función de mantener la misma orientación respecto al plano cartesiano, del eslabón C_3PB_3 , con independencia de la posición.

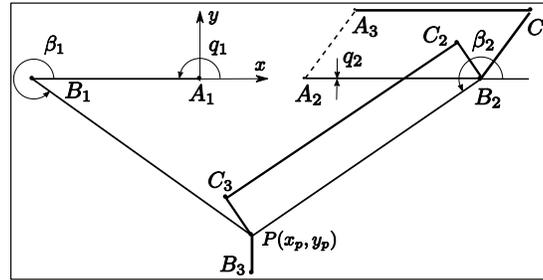


Figura 1. Diagrama cinemático de robot diseñado

El sistema de referencia fijo xy tiene su origen en A_1 , como se muestra en la Figura 1. La longitud de los eslabones A_1B_1 y A_2B_2 se denota como r_1 , mientras que la longitud de los eslabones B_1P y B_2P se denota como r_2 , y la longitud del segmento de A_1 a A_2 se denota como l .

2.1 Modelo cinemático inverso

El modelo cinemático inverso en general mapea las variables operacionales $\mathbf{x} = [x \ y \ z \ \varphi]^T$, donde las tres primeras variables representan la posición del elemento final en el espacio y φ representa en forma general su orientación, al espacio de variables articulares $\mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T$ o $\boldsymbol{\beta} = [\beta_1 \ \beta_2 \ \dots \ \beta_m]^T$, donde n y m son los números de articulaciones actuadas y no actuadas. Por otra parte, en los mecanismos reales por lo general se dispone de sensores solo para las variables articulares actuadas. En tales casos el modelo cinemático inverso se debe resolver usando solo las variables articulares provistas de sensores. De forma general este modelo se puede escribir como

$$\mathbf{q} = \mathbf{g}(\mathbf{x}) \tag{1}$$

$$\boldsymbol{\beta} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) \tag{2}$$

En tales casos, la solución del modelo cinemático inverso no es única, sino que, dependiendo de la configuración del mecanismo, es posible obtener varios conjuntos de variables articulares a partir de un conjunto de variables operacionales (*modo de funcionamiento*, véase [12]). En el robot estudiado, se tienen dos conjuntos de variables articulares: las variables articulares actuadas: q_1 y q_2 , y las variables articulares no actuadas: β_1 y β_2 , mientras que el conjunto de variables operacionales consta de las coordenadas del elemento final: x_p y y_p , en el plano (ver Figura 1).

Denotando como r_{A1} al segmento que va del origen al punto P , y como θ_1 al ángulo que forma dicho segmento con el eje x en sentido anti-horario,

$$\theta_1 = \arctan(y_p/x_p) \tag{3}$$

$$r_{A1} = \sqrt{x_p^2 + y_p^2} \tag{4}$$



es posible escribir :

$$r_1 \cos q_1 + r_2 \cos \beta_1 - r_{A1} \cos \theta_1 = 0 \quad (5)$$

$$r_1 \operatorname{sen} q_1 + r_2 \operatorname{sen} \beta_1 - r_{A1} \operatorname{sen} \theta_1 = 0 \quad (6)$$

Después de manipulación algebraica y de aplicar identidades trigonométricas, se obtiene la expresión:

$$q_1 = \theta_1 \mp \arccos \left(\frac{r_{A1}^2 + r_1^2 - r_2^2}{2r_1 r_{A1}} \right) \quad (7)$$

Siguiendo un procedimiento similar, denotando como r_{A2} al segmento que va del punto $A_2 = (l, 0)$ al punto P , y como θ_2 al ángulo que forma dicho segmento con el eje x en sentido anti-horario,

$$\theta_2 = \arctan(y_p / (x_p - l)) \quad (8)$$

$$r_{A2} = \sqrt{(x_p - l)^2 + y_p^2} \quad (9)$$

se obtiene

$$q_2 = \theta_2 \mp \arccos \left(\frac{r_{A2}^2 + r_1^2 - r_2^2}{2r_1 r_{A2}} \right) \quad (10)$$

Nótese en (7) y en (10) se dan dos soluciones para q_1 y q_2 , que corresponden a cuatro modos de funcionamiento posibles en el manipulador. La obtención del modelo cinemático inverso $\beta = h(x)$ se realiza siguiendo procedimientos similares, con los que se obtiene:

$$\beta_1 = \theta_1 \mp \arccos \left(\frac{r_{A1}^2 + r_2^2 - r_1^2}{2r_2 r_{A1}} \right) \quad (11)$$

$$\beta_2 = \theta_2 \mp \arccos \left(\frac{r_{A2}^2 + r_2^2 - r_1^2}{2r_2 r_{A2}} \right) \quad (12)$$

El modelo cinemático de velocidad relaciona el vector de velocidad operacional $\dot{x} = \partial x / \partial t$, con el vector $\dot{q} = \partial q / \partial t$, y se puede expresar de forma general como:

$$A\dot{x} = B\dot{q} \quad (13)$$

donde las matrices A y B se conocen como matrices jacobianas [5]. Despejando \dot{q} en (13) se obtiene:

$$\dot{q} = B^{-1}A\dot{x} \quad (14)$$



Las matrices jacobianas A y B del mecanismo se obtuvieron en [13]:

$$A = \begin{bmatrix} \cos \beta_1 & \text{sen} \beta_1 \\ \cos \beta_2 & \text{sen} \beta_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$B = r_1 \begin{bmatrix} \text{sen}(\beta_1 - q_1) & 0 \\ 0 & \text{sen}(\beta_2 - q_2) \end{bmatrix} \quad (16)$$

3. Diseño usando SolidWorks®

El diseño del manipulador se realizó en SolidWorks®, el cual incluyó los siguientes pasos: 1. Diseño de las piezas. Se diseñaron en tres dimensiones cada una de las piezas del ensamble, proporcionando las dimensiones en cada uno de los ejes. 2. Creación del ensamble. Se realizó el ensamble mecánico virtual, uniendo las piezas e indicando los grados de libertad relativos así como las restricciones de movimiento de cada una de las piezas dentro del mismo ensamble. 3. Selección del material. Se seleccionó el material para los componentes del ensamble virtual. Las dimensiones de los eslabones se muestran en la Tabla 1. La densidad del material seleccionada fue $\rho = 2710$ [kg/m³]. Esta es la densidad de la aleación de aluminio seleccionado (EN-AW 3105) para construir el robot real en un trabajo futuro.

4.1 Conversión a formato xml

El software utilizado proporciona al usuario la capacidad de exportar el ensamble virtual creado en formato xml. En este formato es posible importarlo desde Matlab®/Simulink®. En este software, a partir del archivo xml importado, se crea un modelo de Simulink® formado por bloques de la biblioteca SimMechanics. El diagrama de bloques resultante de la importación del ensamble se muestra en la Figura 2. En los bloques correspondientes a las articulaciones de rotación del robot, se pueden agregar puertos de actuador y de sensor, para introducir y obtener las señales necesarias, respectivamente, las cuales pueden ser de par o velocidad, para el actuador, y de posición, velocidad o aceleración, para el sensor.

Tabla 1. Dimensiones de los eslabones del robot

Eslabón	Longitud [m]
r_1	0.3
r_2	0.5966
l	0.2046

Una característica útil, que se aprovecha en este estudio, es que es posible crear modelos nuevos, a partir del modelo creado en Simulink® con el ensamble importado, simplemente agregando los bloques necesarios para realizar las operaciones deseadas, tales como representación numérica y gráfica de variables, así como la generación de las señales de control para el modelo del mecanismo.

5. Simulación

Con el fin de estudiar el comportamiento del modelo dinámico generado mediante el procedimiento descrito, bajo condiciones de aplicación de pares (τ_1 y τ_2) en las articulaciones actuadas, se realizaron simulaciones de un sistema en lazo cerrado formado por el modelo dinámico



y un controlador de seguimiento. Se implementó un controlador Proporcional Derivativo (PD) de seguimiento de trayectoria en espacio articular.

La configuración inicial del manipulador es la mostrada en la Figura 1, donde los valores de las variables articulares son $q_1=180$ [grados] y $q_2=0$ [grados]. Las coordenadas de la posición inicial del elemento final son $P = (0.10225, -0.4428)$ [m].

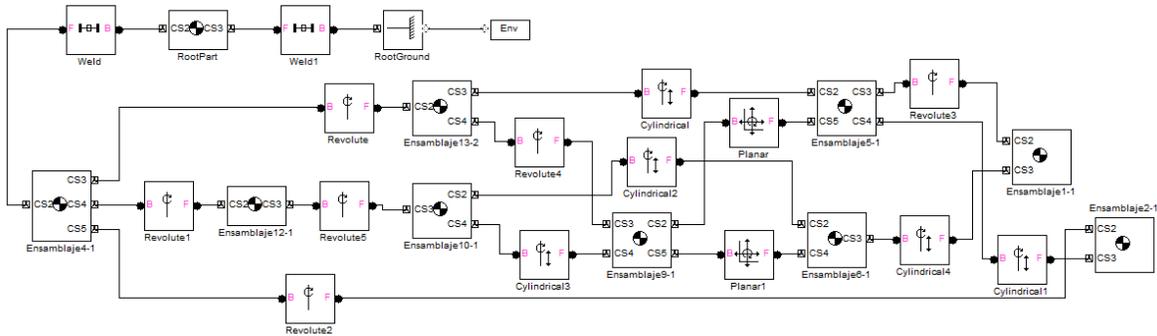


Figura 2. Diagrama de bloques del ensamblaje importado.

5.1 Controlador PD

El controlador de seguimiento recibe vez las referencias de posición y velocidad deseadas, y produce consignas de par, las cuales se alimentan al modelo del mecanismo a través de los bloques de actuador conectados a los bloques de articulaciones actuadas. La posición y la velocidad actuales son proporcionadas por los bloques de sensor conectados a las articulaciones. Se seleccionó un controlador PD debido a su sencillez y facilidad de implementación. Las ganancias empleadas en el controlador se muestran en la Tabla 2.

5.2 Trayectoria deseada

Se diseñó una trayectoria circular en espacio operacional, con diámetro de 0.08 [m], que debe completarse en 4 segundos. El centro de dicho círculo se ubica a una distancia de 0.04 [m] a la derecha de la posición inicial $P(x_p, y_p)$, de manera que el manipulador inicia la trayectoria en el punto medio del lado izquierdo del círculo. Se generaron las referencias de posición y velocidad articular para trazar un círculo y se emplearon los modelo cinemáticos inversos de posición y de velocidad obtenidos en (12), (16), (17), (18) y (20) para obtener las referencias articulares de posición y velocidad.

5.3 Resultados de la simulación

La Figura 3 muestra una imagen de la animación generada por Simulink® del movimiento del modelo creado en SolidWorks®. En esta ventana se dispone de varios controles para modificar la visualización de la animación, para inicio y paro de la simulación, entre otros. La Figura 4 muestra los errores de posición obtenidos \tilde{q}_1 y \tilde{q}_2 , respectivamente. La Figura 5 muestra los pares deseados generados por el controlador PD, para las articulaciones actuadas 1 y 2, respectivamente. Nótese que los errores obtenidos son pequeños, por debajo de 5.7 [grad] en q_1 y 8.6 [grad] en q_2 , como respuesta a los pares aplicados, que están por debajo de sus valores iniciales de 3.5 [Nm] y 2.7 [Nm] para τ_1 y τ_2 , respectivamente. Esto indica que el comportamiento del modelo dinámico es adecuado para la tarea deseada y los pares introducidos.

Tabla 2. Ganancias del controlador PD

Articulación	K_p [Nm/grad]	K_v [Nm s/grad]
1	40	15
2	40	15

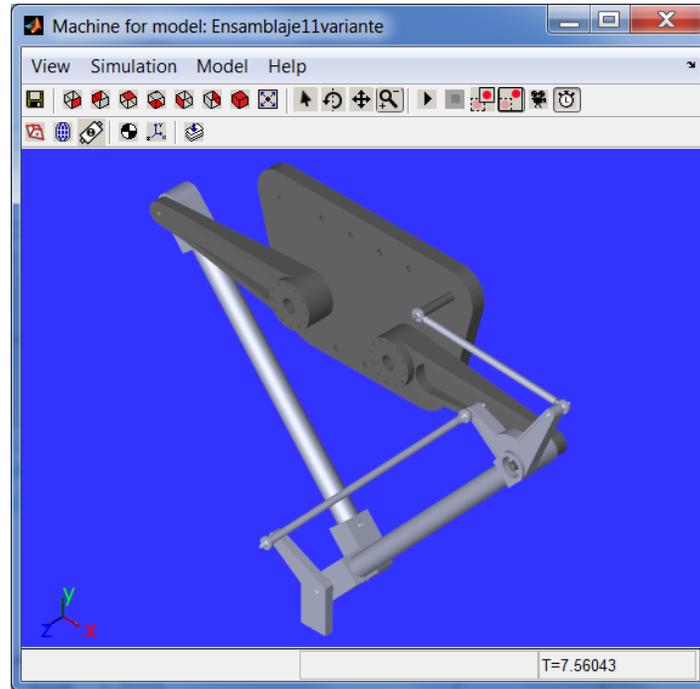


Figura 3. Animación del movimiento del manipulador

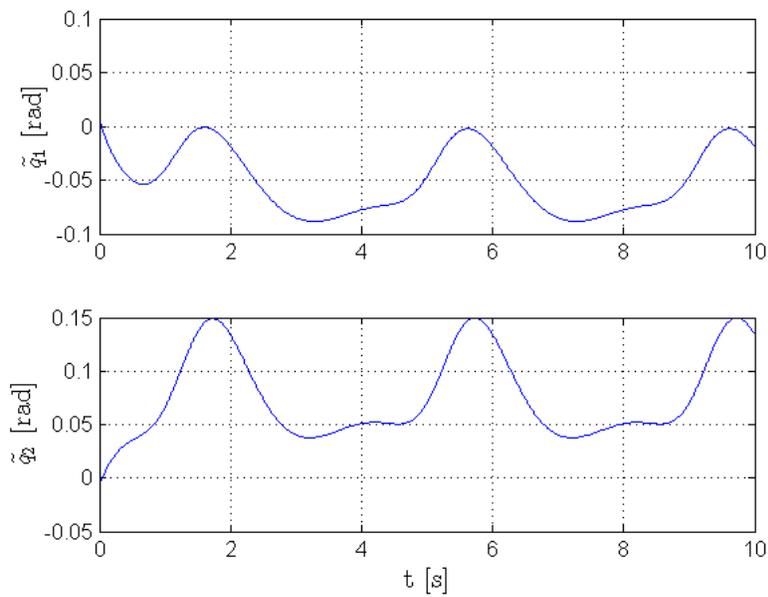


Figura 4. Errores obtenidos \tilde{q}_1 y \tilde{q}_2

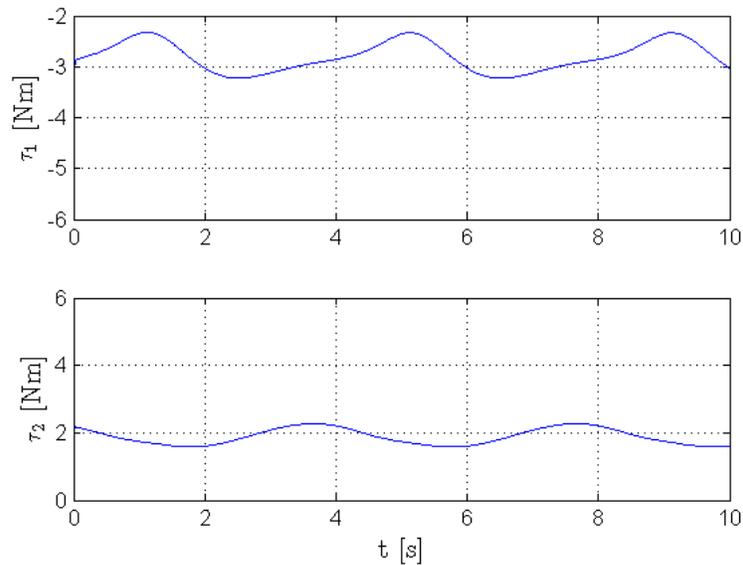


Figura 5. Pares deseados τ_1 y τ_2

6. Conclusiones

En este artículo se presentó un método para la obtención de un modelo dinámico de un robot paralelo planar de dos grados de libertad, mediante la utilización de SolidWorks®. Se mostraron las simulaciones de la aplicación de un controlador de seguimiento PD al modelo dinámico generado, así como los resultados obtenidos. Dichos resultados comprueban que el modelo obtenido puede ser utilizado en pruebas de algoritmos de control. Cabe hacer notar que, a partir de un ensamble virtual, la rapidez de generación del modelo dinámico mediante SolidWorks® y Simulink® es relativamente alta en comparación con la rapidez de obtención de un modelo analítico, lo cual puede ser conveniente en casos en los que no se requiere el modelo dinámico del robot en forma analítica.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo de la SEP México a través de PRODEP.

Referencias

- [1] Patel, Y.D.; George, P.M., "Parallel Manipulators Applications - A Survey", Modern Mechanical Engineering, vol. 2, pp. 57-64, 2012.
- [2] Martínez, E.; Peña, César, "Diseño Óptimo de un Robot Paralelo con Configuración Delta para Aplicaciones Educativas", Revista Educación en Ingeniería, No. 10, pp. 110-119, 2010.
- [3] Nan, Rendong; Li, Di; Jin, Chengjin; Wang, Qiming; Zhu, Lichun; Zhu, Wenbai; Zhang, Haiyan; Yue, Youling; Qian, Lei; "The Five-Hundred-Meter Aperture Spherical Radio Telescope (FAST) Project", International Journal of Modern Physics D, vol. 20, pp. 989-1024, 2011.
- [4] Aracil, R.; Salterén, R. J.; Sabater, J. M.; Reinoso, O.; "Robots Paralelos: Máquinas con un Pasado para una Robótica del Futuro", Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, vol. 3, pp. 16-28, 2006.
- [5] Tsai, L. W. "Robot Analysis", John Wiley & Sons, EUA, 1999.
- [6] Khalil, W., & Dombre, E. "Modeling, Identification and Control of Robots", Kogan Page Science, Reino Unido, 2002.
- [7] Solidworks, "Motion Analysis Overview", Recuperado el 20 de Enero de 2016, de <http://www.solidworks.com/sw/products/simulation/motion-analysis.htm>, 2016.



- [8] Siemens, "*Motion Analysis: Design-Integrated Multibody Dynamics Simulation*", Recuperado el 20 de Enero de 2016, de <http://www.plm.automation.siemens.com/en/us/products/nx/for-simulation/>, 2016.
- [9] Dassault Systemes. "*CATIA Systems Engineering*", Recuperado el 20 de Enero de 2016, de <http://www.3ds.com/products-services/catia/products/v6/portfolio/digital-product-experience/s/catiasystems-engineering/>, 2016.
- [10] Ghorbel, F. H.; Chélat, O.; Gunawardana, R.; Longchamp, R.; "*Modeling and Setpoint Control of Closed-Chain Mechanisms: Theory and Experiments*", IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol.8, pp. 801-815, 2000.
- [11] Wobbe, F.; Kolbus, M.; Schumacher, W.; "Enhanced Motion Control Concepts on Parallel Robots", en Automation and Robotics, J. M. Ramos Arreguín (Ed.), InTech, 2008.
- [12] Liu, X., Wang, J., & Pritschow, G. "*Kinematics, singularity and workspace of planar 5R symmetrical parallel mechanisms*", Mechanism and Machine Theory, 145-169, 2006.
- [13] Alvarado, O. "*Construcción, Modelado y Control de un Mecanismo Tipo Péndulo Invertido Esférico*", Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de La Laguna, Torreón, Coah., 2010.



Algoritmo que determina la trayectoria de un manipulador móvil para abrir una puerta consumiendo mínima potencia

Erik Peña Medina¹, Víctor Javier Gonzales Villela², Marcelo López Parra³, Noé Alfredo Martínez Sánchez⁴.

Departamento de ingeniería mecatrónica Facultad de Ingeniería UNAM. Centro de ingeniería avanzada (CIA)^{1,2,4}. Unidad de desarrollo tecnológico Querétaro UNAM (UDETEQ)²

Resumen

En este trabajo se presenta un algoritmo para determinar la posición y la configuración de un manipulador móvil mientras abre una puerta en función de la potencia consumida por los actuadores de su manipulador serial. Con la información de la trayectoria obtenida, se estimará cuál es el tipo de móvil más adecuado para conformar al dispositivo. El algoritmo generado está conformado por un modelo de un manipulador serial RRR con emplazamiento y el modelado para la apertura de una puerta emplea un perfil cinemático de quinto grado. Se presentan los resultados de una simulación del manipulador móvil abriendo una puerta convencional para interiores. Los resultados muestran que el robot tiende a minimizar la potencia consumida por sus actuadores al mantener una determinada postura mientras abre la puerta. El algoritmo presentado, tiene como objetivo establecer una herramienta para determinar el tipo de móvil del robot, y determinar la longitud de los eslabones, para que el robot pueda moverse dentro de un espacio estructurado como una casa u oficina.

Palabras clave: robot móvil, trayectoria, reconfiguraciones, apertura, puerta, mínima potencia, modelado de una puerta.

1. Introducción

Los robots son sistemas mecatrónicos que coexistirán y convivirán con los seres humanos en una gran variedad de ambientes estructurados donde estos últimos habitan, realizando diversas tareas. Cada uno de estos ambientes tiene un contexto específico (casas, escuelas, hospitales, oficinas, etc.) donde los robots ejecutarán diferentes actividades [1-4]. En la mayoría de los casos la estructura mecánica de estos dispositivos está diseñada para este tipo de ambientes, estando conformada por una cadena cinemática serial, lo que le brinda un cierto parecido con los seres humanos haciendo más fácil su convivencia con estos [5]. Se espera que estos robots manipulen los objetos de su entorno de manera similar a un ser humano, pero lo anterior resulta ser muy complicado por las diferencias entre las dimensiones de las partes de los brazos humanos y las dimensiones de los eslabones de los robots [5].

Actualmente se trabajan en diferentes enfoques para integrar a los robots a los entornos donde los seres humanos realizan sus actividades, como por ejemplo, en ambientes de oficinas [2, 6, 7]. Para que los robots sean capaces de coexistir e interactuar con las personas en este tipo de ambientes deben ser capaces de moverse a través de él, abriendo constantemente puertas. El análisis para que un robot pueda abrir algún tipo de puerta consta de dos partes, que son:



- El determinar los requerimientos y restricciones impuestas al robot por la acción de abrir la puerta.
- El determinar la manera en la que el robot en cuestión realizará la tarea.

En el caso de determinar los requerimientos y restricciones impuestas por la puerta se han desarrollado sistemas de sensado. Por ejemplo, Jain et al [8] crean un sistema para medir todos los parámetros presentes cuando una persona abre una puerta o un cajón en una oficina. El objetivo de este enfoque es usar la información obtenida para establecer los parámetros de diseño para robots capaces de abrir diferentes tipos de puertas y cajones. En el caso de como el robot debe abrir la puerta se ha trabajado principalmente en cinco enfoques en la última década [9]:

- El detectar la puerta y el picaporte, la mayoría de los trabajos relacionados con este punto emplean procesamiento de imágenes para identificar todos los elementos relacionados con la tarea [10-12].
- El quitar el pasador, es decir la puerta se considera abierta cuando el robot es capaz de abrir la cerradura de la puerta [12, 13].
- El establecimiento de esquemas de control de par, estos enfoques tienen como objetivo determinar las configuraciones del robot en función de minimizar los pares en las juntas del robot [9, 10, 14].
- Establecer una planeación de movimiento para abrir la puerta [15].
- Establecer estimaciones cinemáticas de la estructura por medio de analizar imágenes y la aplicación de modelos probabilísticos [16, 17].

Los robots empleados en los enfoques antes mencionados son manipuladores móviles con algún tipo de locomoción. La capacidad de estos manipuladores para interactuar con su entorno depende de las dimensiones de los eslabones que integran al robot serial. El espacio de trabajo del robot serial en la mayoría de los casos no es lo suficientemente grande por si solo para que el dispositivo logre abrir la puerta, es por ello que es necesario establecer una trayectoria para una plataforma móvil, y en conjunto ambos sistemas puedan abrir la puerta.

En el caso de la trayectoria que debe seguir el robot móvil para abrir la puerta se manejan dos enfoques; establecer la trayectoria en función de los pares del robot o realizar una planeación de la trayectoria. En ambos casos, la trayectoria se basa en las condiciones impuestas por la relación entre las fuerzas presentes para abrir la puerta y los pares en las juntas del robot. Los enfoques antes mencionados, resultan ser muy complejos debido a la cantidad de variables que se deben considerar, lo que requiere de mucho procesamiento de información volviendo lenta la ejecución de la tarea.

En este trabajo se presenta un nuevo enfoque para determinar la manera en que un manipulador móvil abre la puerta en función de la potencia que consumen sus actuadores. Por un lado, para este caso se modeló un robot serial RRR el cual está montado sobre una plataforma móvil que abrirá una puerta, y sus configuraciones se determinarán para reducir el consumo de potencia de sus actuadores. Por otro lado, también se presenta la propuesta de un modelo de la puerta, en el cual el ángulo de apertura sigue un perfil quintico para que el robot abra la puerta de manera suave.

En la parte 2 de este trabajo se presenta el planteamiento del problema y el modelado de los elementos que integran la tarea. En la parte 3, se presenta el planteamiento del método presentado para determinar la trayectoria de la plataforma móvil que permita reducir la potencia de los actuadores. En la parte 4 se presentan los resultados de una simulación. En la parte 5 se presentan las conclusiones de este trabajo.

2. Planteamiento del problema

Para establecer la manera en que el manipulador móvil abrirá una puerta es necesario establecer como el manipulador serial interactúa con esta.

2.1 Modelado de la puerta

En la Figura 1, se observa como el manipulador móvil interactúa con la puerta en un punto que representa el picaporte de esta. Dicho punto debe seguir una trayectoria ya fija por las restricciones en el movimiento de la puerta. El modelo para la apertura de la puerta se establece de tal manera que el robot debe proporcionar una fuerza \vec{F}_{RD} perpendicular a la puerta y tangente a la trayectoria S_{Door} del picaporte, como se muestra en la figura 2.

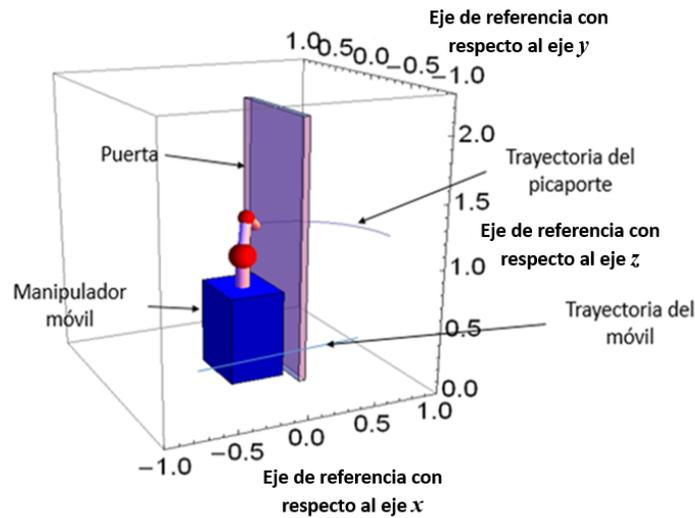


Figura 1. Robot interactuando con la puerta.

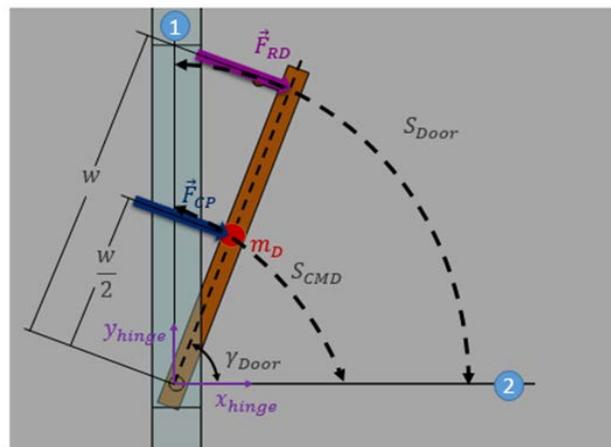


Figura 2. Diagrama de fuerzas de la acción de abrir una puerta.

La fuerza \vec{F}_{RD} debe ser capaz de vencer la inercia de la puerta para que esta gire y pase de la posición 1 a la posición 2 de una manera suave, modificando el ángulo de apertura γ_{Door} . El ángulo



γ_{Door} de apertura de la puerta se mide con respecto al eje x_{hinge} y gira sobre el eje z_{hinge} se encuentra contenido sobre el eje de rotación de las bisagras, como se muestra en la figura 2. El ángulo γ_{Door} pasa de $\pi/2$ cuando la puerta está cerrada (posición 1) a cero cuando la puerta está abierta (posición 2). Para que la apertura de la puerta sea lo más suave posible en su perfil de velocidades y aceleraciones, se empleó un perfil quintico para el ángulo de apertura de la puerta. El perfil quintico se empleó debido a que es uno de los más empleados en la robótica, por ser suave y continuo, para parametrizar en función del tiempo una trayectoria [18].

$$\gamma_{Door} = \gamma_{initial} + \left(\frac{10t^3}{t_f^3} - \frac{15t^4}{t_f^4} + \frac{6t^5}{t_f^5} \right) (\gamma_{final} - \gamma_{initial}) \quad (1)$$

$$\dot{\gamma}_{Door} = \left(\frac{30t^2}{t_f^3} - \frac{60t^3}{t_f^4} + \frac{30t^4}{t_f^5} \right) (\gamma_{final} - \gamma_{initial}) \quad (2)$$

$$\ddot{\gamma}_{Door} = \left(\frac{60t}{t_f^3} - \frac{180t^2}{t_f^4} + \frac{120t^3}{t_f^5} \right) (\gamma_{final} - \gamma_{initial}) \quad (3)$$

Empleando el perfil antes mencionado se obtienen las funciones (1), (2) y (3), que describen al ángulo γ_{Door} , velocidad angular $\dot{\gamma}_{Door}$ y aceleración $\ddot{\gamma}_{Door}$ angular, de la apertura de la puerta en un instante del tiempo t definido para realizar la tarea. Donde $\gamma_{initial}$ y γ_{final} , son el ángulo de inicio (puerta cerrada, $\gamma_{initial} = \pi/2$) y el ángulo final (puerta abierta, $\gamma_{final} = 0$) respectivamente.

Con las funciones anteriores se puede determinar la posición, la velocidad y la aceleración lineal del picaporte mientras se abre la puerta. En (4) se describe la posición del picaporte con respecto al sistema de referencia ubicado en las bisagras como se muestra en la figura 2.

$$S_{Door} = \begin{bmatrix} x_{hinge} + w \cos(\gamma_{Door}) \\ y_{hinge} + w \sin(\gamma_{Door}) \\ h_{hinge} \end{bmatrix} \quad (4)$$

En (4), x_{hinge} y y_{hinge} son las coordenadas del eje de de rotación de las bisagras con respecto al sistema inercial 0 , w es el ancho de la puerta y h_{hinge} es la altura con respecto al piso donde se encuentra el picaporte. Al derivar (4) se pueden obtener la velocidad lineal (5) y la aceleración lineal (6) del picaporte mientras el robot abre la puerta siguiendo las condiciones cinemáticas del perfil establecido.

$$\dot{S}_{Door} = \begin{bmatrix} -w \sin(\gamma_{Door}) \dot{\gamma}_{Door} \\ w \cos(\gamma_{Door}) \dot{\gamma}_{Door} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\ddot{S}_{Door} = \begin{bmatrix} -w \sin(\gamma_{Door}) \ddot{\gamma}_{Door} - w \cos(\gamma_{Door}) \dot{\gamma}_{Door}^2 \\ w \cos(\gamma_{Door}) \ddot{\gamma}_{Door} - w \sin(\gamma_{Door}) \dot{\gamma}_{Door}^2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Las funciones anteriores se emplearán para establecer y resolver la cinemática inversa del

manipulador serial. Para el caso de la puerta se considera que es un cuerpo rígido ideal y que su centro de masa se encuentra en el centroide de la puerta. Se considera que el centro de masa se encuentra en la mitad de la distancia w entre el eje de las bisagras y el picaporte. Con base en lo anterior, empleando (6) se determina que la fuerza \vec{F}_{m_D} que expremienta el centro de masa de la puerta mientras la puerta se abre es la siguiente:

$$\vec{F}_{m_D} = \frac{m_D}{2} \begin{bmatrix} -w \sin(\gamma_{Door}) \ddot{\gamma}_{Door} - w \cos(\gamma_{Door}) \dot{\gamma}_{Door}^2 \\ w \cos(\gamma_{Door}) \ddot{\gamma}_{Door} - w \sin(\gamma_{Door}) \dot{\gamma}_{Door}^2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Donde m_D es la masa de la puerta. Los efectos del vector de fuerza (7) deben ser trasladados al punto del picaporte. El momento que afecta al centro de masa y al punto del picaporte es el mismo, pero las fuerzas perpendiculares que abren la puerta disminuyen conforme crece la distancia entre su punto de aplicación con respecto al eje de giro de las bisagras. La fuerza que se debe aplicar sobre el picaporte para abrir la puerta es la siguiente:

$$\vec{F}_{RD} = \begin{bmatrix} F_{RDx} \\ F_{RDy} \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{m_D}{4} \begin{bmatrix} -w \cdot \sin(\gamma) \cdot \ddot{\gamma} - w \cdot \cos(\gamma) \cdot \dot{\gamma}^2 \\ w \cdot \cos(\gamma) \cdot \ddot{\gamma} - w \cdot \sin(\gamma) \cdot \dot{\gamma}^2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Para modelar la puerta se empleó la información de la norma UNE56803, con un ancho w de 7.25 [m] de ancho, una altura de 2.03 [m] de altura y un espesor de 0.35 [m] y con un peso de 16 [kg]. Para abrir la puerta se considera que su peso es soportado por las bisagras, y la fricción que se produce en estas es despreciable. Se espera que el robot abra la puerta en un tiempo estimado de $t_f = 1.6$ [seg], que es un tiempo que se encuentra dentro del rango promedio de tiempo en que una persona abre una puerta [9]. Para este caso se considera que el robot interactúa con la puerta en un punto descrito por el vector de posición x . En x el robot transmite a la puerta la fuerza necesaria para abrirla según los requerimientos establecidos por el modelo de esta. En dicho punto únicamente se considera la interacción del robot con la puerta.

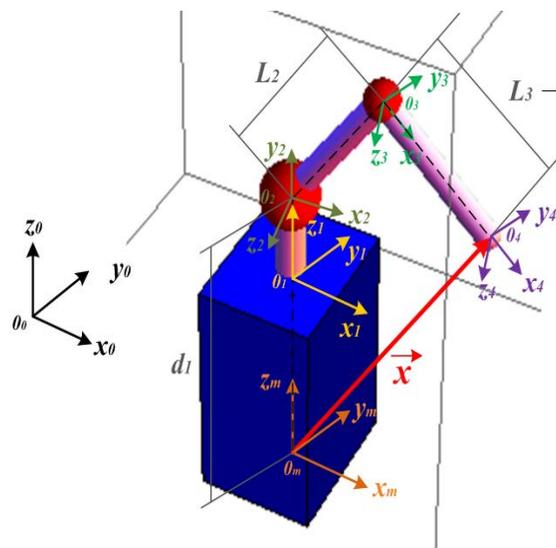


Figura 3. Planteamiento del modelo del manipulador móvil.



2.2 Modelado del robot

Para determinar la trayectoria del móvil para abrir la puerta en función de la potencia del manipulador serial, es necesario modelarlos por separado. Para el móvil se considera que mientras abre la puerta siempre está estable y se desplaza libremente. El manipulador está modelado con tres juntas rotacionales y está unido al móvil en un sistema de referencia m . La ubicación del sistema m que describe al móvil y al manipulador se describe desde el sistema inercial 0 .

A partir del sistema m del móvil se obtienen los siguientes parámetros de Denavit-Hantenberg (D-H):

Tabla 1. Parámetros de D-H.

i	α_i	d_i	b_i	θ_i
1	$\pi/2$	0	b_1	θ_1
2	0	L_2	0	θ_2
3	0	L_3	0	θ_3

Para modelar al robot se sustituyen los parámetros anteriores en la siguiente transformación para describir la posición y orientación del órgano terminal (OT) del robot:

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

La transformación que describe al manipulador sobre el móvil es (considerando que θ_m está alineada al sistema de referencia de la junta θ_1):

$${}^{0m}A_4 = {}^{0m}A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot {}^2A_3 \cdot {}^3A_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 (\cos(\theta_2 + \theta_3)) & \cos \theta_1 (-\sin(\theta_2 + \theta_3)) & \sin \theta_1 & x_m + \cos \theta_1 (L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos(\theta_2)) \\ \sin \theta_1 (\cos(\theta_2 + \theta_3)) & \sin \theta_1 (-\sin(\theta_2 + \theta_3)) & -\cos \theta_1 & y_m + \sin \theta_1 (L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos(\theta_2)) \\ \sin(\theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_2 + \theta_3) & 0 & b_1 + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

El vector que describe la interacción entre el robot y la puerta es :

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} x_m + \cos \theta_1 (L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos(\theta_2)) \\ y_m + \sin \theta_1 (L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos(\theta_2)) \\ b_1 + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \sin(\theta_2) \end{bmatrix} \quad (11)$$

En (11), x_m y y_m corresponden al vector de emplazamiento que modifica la ubicación del sistema m del manipulador móvil con respecto al sistema inercial 0 . Con (4), (5), (6) y (11) se plantea la solución de la cinemática inversa del robot. El planteamiento de la cinemática inversa es expresado por (12) y (13):

$$\dot{\vec{x}} = J\dot{\vec{q}} \rightarrow \dot{\vec{q}} = J^{-1}\dot{\vec{x}} \quad (12)$$

$$\ddot{\vec{x}} = \dot{J}\dot{\vec{q}} + J\ddot{\vec{q}} \rightarrow \ddot{\vec{q}} = J^{-1}(\ddot{\vec{x}} - \dot{J}\dot{\vec{q}}) \quad (13)$$



Para el cálculo de la potencia inercial se empleo el método de Euler-Lagrange. Para ello se cálculo la propagación de velocidades en cada uno de los eslabones y en sus respectivos centro de masa empleando las siguientes relaciones:

$${}^i\vec{\omega}_i = {}^{i-1}\mathbf{R}_i \left({}^{i-1}\vec{\omega}_{i-1} + \hat{z}_{i-1}\dot{\theta}_i \right) \quad (14)$$

$${}^i\vec{v}_i = {}^{i-1}\mathbf{R}_i {}^{i-1}\vec{v}_{i-1} + {}^i\vec{\omega}_i \times {}^{i-1}\vec{p}_i \quad (15)$$

$$\vec{v}_{ci} = {}^{i-1}\mathbf{R}_i {}^{i-1}\vec{v}_{i-1} + {}^i\vec{\omega}_i \times {}^{i-1}\vec{p}_{ci} \quad (16)$$

Para el cálculo de los pares se calcularon la energía cinetica y la energía potencial para cada uno de los eslabones empleando las siguientes ecuaciones:

$$k_i = \frac{m_i}{2} \vec{v}_{ci}^T \vec{v}_{ci} + \frac{1}{2} {}^i\vec{\omega}_i^T I_{ci} {}^i\vec{\omega}_i \quad (17)$$

$$u_i = m_i \vec{g}^T {}^0\vec{p}_{ci} \quad (18)$$

Con el empleo de (17) y (18) se obtuvo el Lagrangiano del robot (19), para después obtener los pares en cada junta utilizando (20).

$$L = \sum_{i=1}^n k_i - \sum_{i=1}^n u_i \quad (19)$$

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (20)$$

2.3 Ecuación de potencia del robot serial

Para el cálculo de la potencia es necesario obtener primero los pares totales en cada una de las junta del robot para abrir la puerta. Los pares que deben proporcionar los actuadores para abrir la puerta por efectos de empujarla se calculan proyectando el vector de fuerza \vec{F}_{mD} en el pica porte sobre el espacio de la juntas del robot empleando la siguiente expresión:

$$\tau_{Door} = \mathbf{J}^T \vec{F}_{RD} = \mathbf{J}^T \begin{bmatrix} F_{RDx} \\ F_{RDy} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Los pares expresados en (21) deben sumarse a los pares que deben proporcionar cada uno de los motores para mover la inercia de los eslabones (20). El vector de pares total que los actuadores deben proporcionar para abrir la puerta son los siguientes:

$$\vec{\tau}_R = \mathbf{M}\ddot{\vec{q}} + \mathbf{V}(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) + \vec{G}(\vec{q}) + \mathbf{J}^T \vec{F}_{Door} \quad (22)$$

La potencia mecánica ideal que requieren los motores para abrir la puerta es la siguiente:

$$P_R = \vec{\tau}_R^T \dot{\vec{q}} = \mathbf{M}\ddot{\vec{q}}^T \dot{\vec{q}} + \mathbf{V}(\vec{q}, \dot{\vec{q}})^T \dot{\vec{q}} + \left(\mathbf{J}^T \vec{F}_{RD} \right)^T \dot{\vec{q}} \quad (23)$$

3. Determinación de la trayectoria del móvil

El móvil se desplaza sobre una determinada región sobre el plano x_0y_0 del sistema inercial. La trayectoria del móvil se obtiene discretizando la región por donde se puede desplazar el móvil y determinando los puntos donde los actuadores del robot tienden a minimizar la potencia que consumen mientras avanza para abrir la puerta. El móvil se desplaza sobre el x_0 , para este caso se propone que el móvil avance a una velocidad constante y cambie de posición sobre el eje y_0 . La siguiente figura muestra la región por la cual el robot puede moverse para abrir la puerta.

La posición está en función de la potencia consumida por el manipulador serial, por lo que los efectos cinemáticos y dinámicos que el móvil le puede transferir en este caso no son tomados en cuenta. El diagrama de la figura 5, ilustra cómo se determinaron la trayectoria del móvil para abrir la puerta. A continuación, se presenta una simulación y los parámetros empleados en ella, para mostrar el funcionamiento del método presentado.

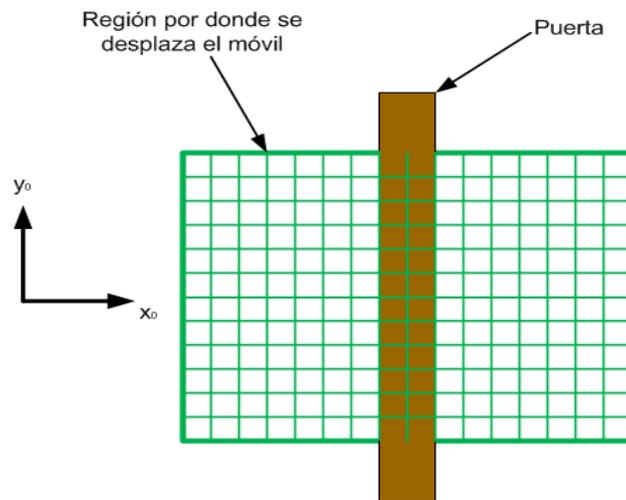


Figura 4. Región en el plano x_0y_0 por donde el robot se puede mover para abrir la puerta.

4. Simulación y resultados de la trayectoria del móvil

El resultado del algoritmo anterior, es un programa en el cual se puede simular a un manipulador móvil con ciertos parámetros de sus eslabones abriendo una puerta. Se presenta los resultados de una simulación donde se consideran a los eslabones del robot como prismas rectangulares, como se muestra en la figura 6.

Para cada uno de los eslabones se considera que su matriz de inercia es la siguiente:

$$I_{ci} = \frac{m_i}{12} \begin{bmatrix} h_i^2 + b_i^2 & 0 & 0 \\ 0 & h_i^2 + L_i^2 & 0 \\ 0 & 0 & b_i^2 + L_i^2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Los parámetros definidos para cada eslabón se presentan en la tabla 2.

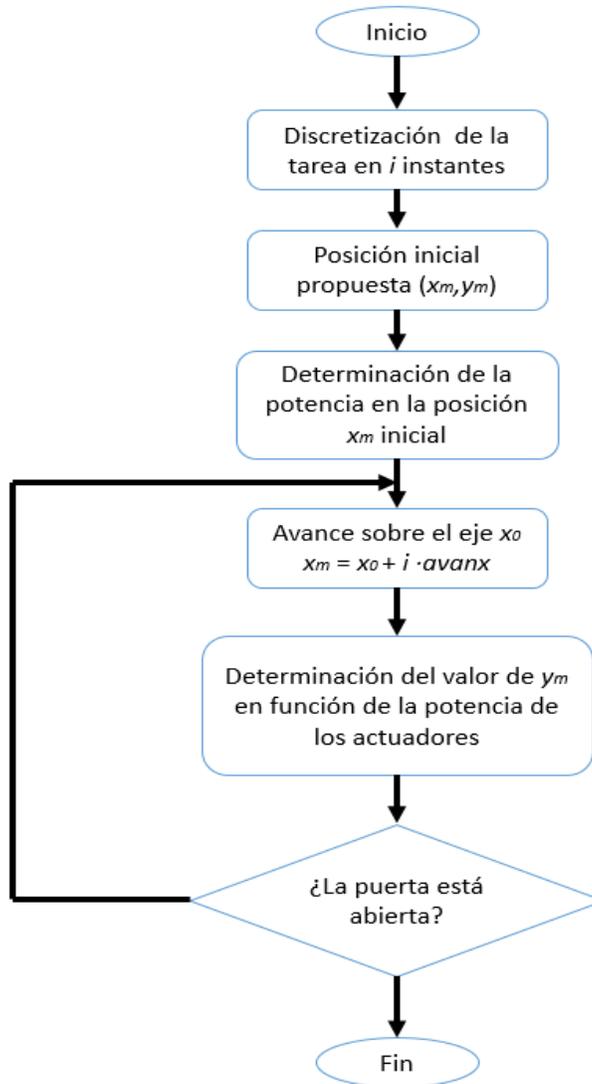


Figura 5. Algoritmo para determinar la trayectoria del móvil sobre el plano x_0y_0 del sistema inercial.

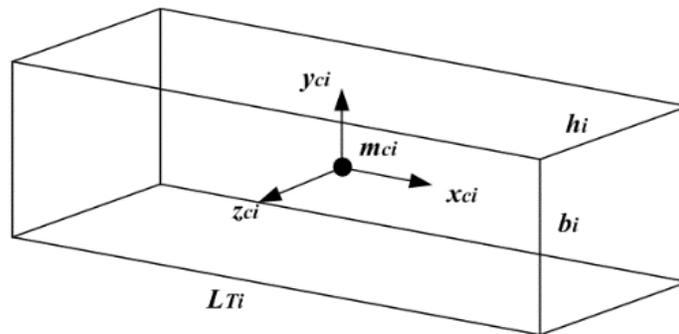


Figura 6. Forma de los eslabones considerada para este ejemplo.



Tabla 2– Parámetros inerciales de los eslabones del robot.

Parámetro	Valor
m_1	3 [kg]
m_2	2 [kg]
m_3	1.5 [kg]
h_1	0.2 [m]
h_2	0.15 [m]
h_3	0.1 [m]
b_1	0.3 [m]
b_2	0.15 [m]
b_3	0.1 [m]

En la tabla 3, se presentan las coordenadas donde se localiza el eje de rotación de las bisagras desde el sistema inercial θ , además del ancho de la puerta y su masa. En la tabla 4, se presentan los parámetros geométricos de los eslabones y la altura d_i del manipulador con respecto al piso. Se estableció que el robot avanzara con una velocidad de 0.6 [m/s] mientras abre la puerta. Al sustituir los parámetros anteriores en el planteamiento presentado en el algoritmo de la figura 5, se obtiene la trayectoria que debe recorrer el móvil mientras abre la puerta (figura 7).

Tabla 3– Parámetros empleados para describir la puerta.

Dimensiones	Valor
w	0.7 [m]
d_{xhinge}	0.6 [m]
d_{yhinge}	-0.4 [m]
m_D	16 [kg]

Tabla 4– Parámetros de la puerta.

Parámetro	Valor
d_1	0.95 [m]
L_1	0.1 [m]
L_2	0.5 [m]
L_3	0.45 [m]

En la figura 8, se muestra al robot mientras abre la puerta, sobre el plano x_0y_0 se observa la trayectoria del móvil y en extremo del OT la trayectoria del picaporte. Las siguientes graficas muestran el comportamiento de cada una de las juntas del manipulador mientras va abriendo la puerta.

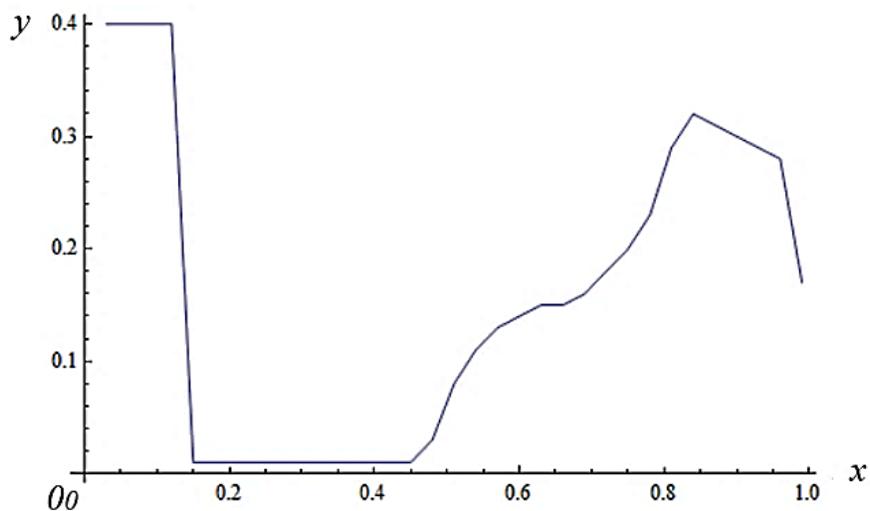


Figura 7. Trayectoria del móvil para abrir la puerta descrita desde el sistema inercial 0.

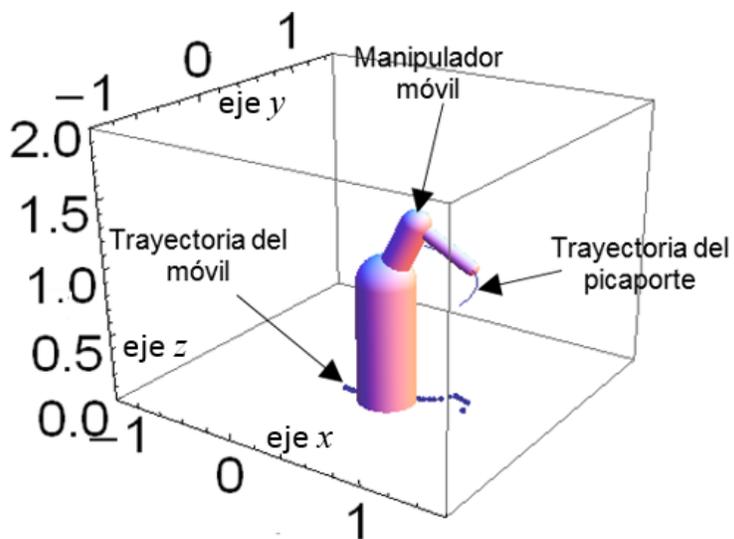


Figura 8. Manipulador móvil abriendo la puerta.

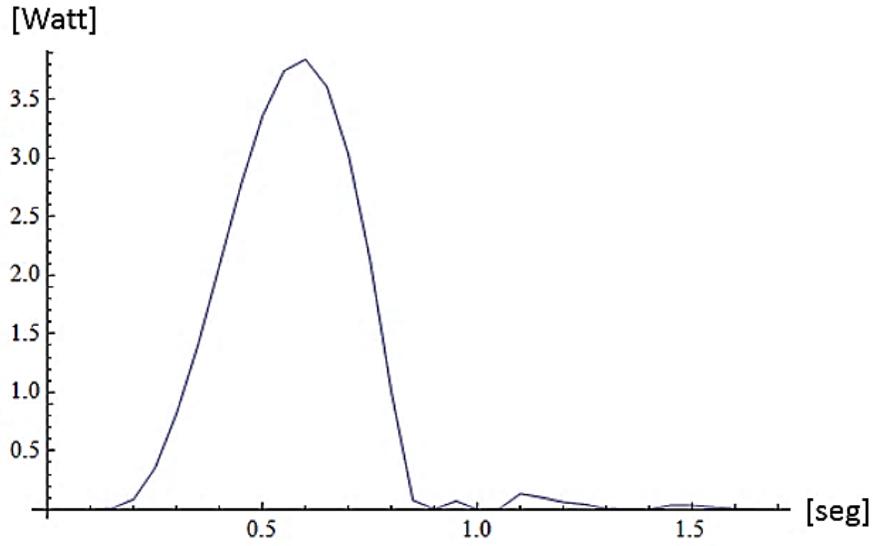


Figura 9. Comportamiento del consumo de potencia de los actuadores mientras el robot abre la puerta.

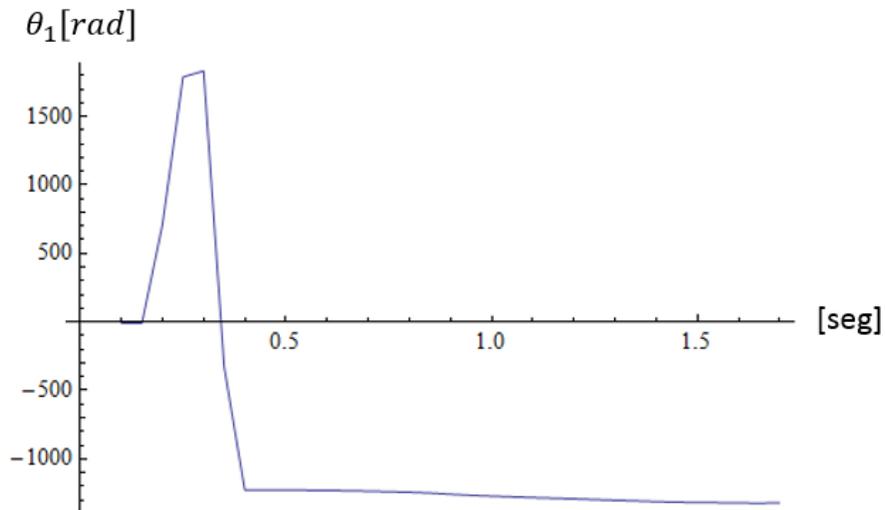


Figura 10. Comportamiento de la primera junta del manipulador.

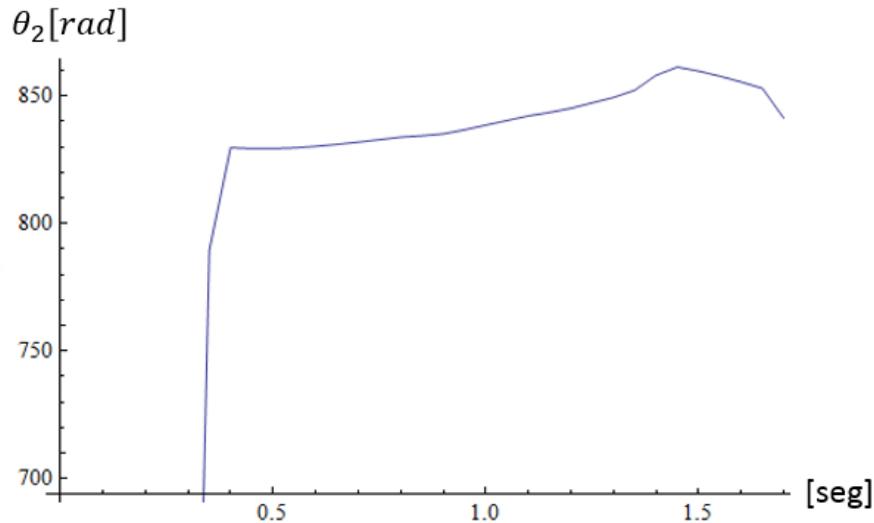


Figura 11. Comportamiento de la primera junta del manipulador.

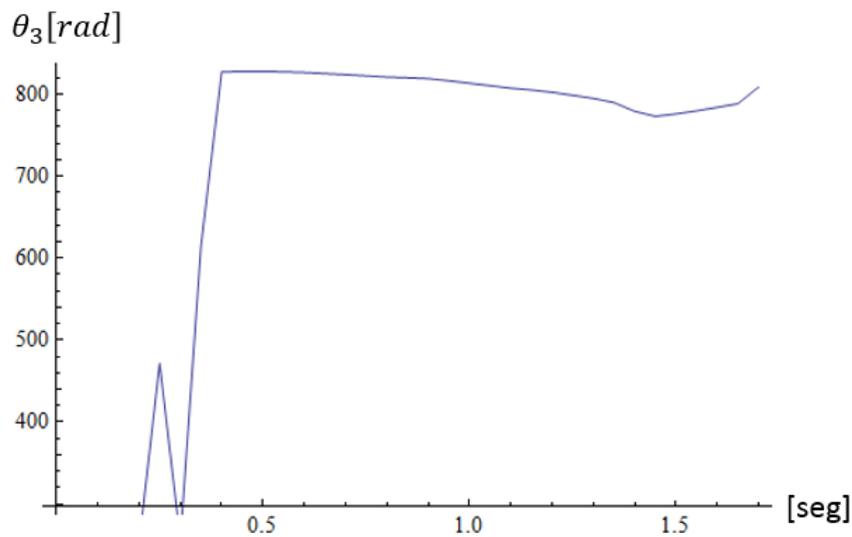


Figura 12. Comportamiento de la tercera junta del manipulador.

En las gráficas anteriores, se observa que la posición de las juntas tiende a mantenerse mientras el manipulador abre la puerta. Lo anterior implica que el móvil debe moverse de tal manera que las cargas se distribuyan entre el manipulador y el móvil, de tal manera que el robot manteniendo su postura ayude al móvil a empujar la puerta, similar a cuando una persona abre una puerta.

5. Conclusiones

Los resultados de este trabajo muestran que es posible determinar la trayectoria y las configuraciones para que un manipulador móvil abra una puerta minimizando el consumo de potencia de los actuadores del manipulador serial. En las gráficas que describen el comportamiento de las



juntas se observa que los dos últimos eslabones del manipulador serial tienden a mantener un ángulo de $\pi/2$. El que el robot mantenga una postura mientras abre la puerta es un comportamiento similar al de una persona. En el caso de los seres humanos cuando abren una puerta la empujan empleando su cuerpo, y en la simulación el móvil empuja la puerta, el manipulador serial soporta las cargas. En el caso del robot, el modelado se limitó al robot serial debido a que dependiendo de la trayectoria se podría determinar el tipo de configuración del móvil. De acuerdo con los resultados un móvil omnidireccional serial la mejor opción, ya que permitiría orientar y mover al manipulador serial para que pueda abrir la puerta con la menor dificultad posible. El modelado de la puerta y del robot se establecieron considerando condiciones ideales, los factores que no se consideraron solo pueden ser obtenidos mediante la experimentación directa entre el robot y la puerta. El algoritmo al ser un método discreto requiere de cierto procesamiento, en el caso de la simulación se empleó un método numérico para determinar las configuraciones del manipulador, pero para su implementación se debe de establecer un método más directo, por ejemplo, una solución geométrica de la configuración. La solución de la posición del robot se realizó por medio del método de Newton-Raphson, por lo que es necesario establecer una aproximación previa de la solución, además en las gráficas se observa que los resultados tienden a converger en un determinado valor y se requiere de una adecuación de estos, para hacer uso de ellos de manera práctica.

Como trabajo a futuro se debe completar la simulación considerando ya al móvil omnidireccional dentro del modelo del manipulador móvil, y posteriormente debe de comprobar el método establecido por medio de experimentación implementando un banco de pruebas. El modelado presentado establece las bases para estimar como un manipulador móvil abrirá una puerta o manipule otro objeto dentro de su espacio de trabajo, estableciendo previamente un modelo cinemático y dinámico de la tarea.

El determinar las configuraciones de un robot móvil por medio de la potencia para que realice una tarea es un enfoque muy poco trabajado. Este tipo de análisis permite determinar la capacidad de potencia que necesita un robot para realizar una tarea o establecer si un robot ya construido tiene la capacidad de ejecutarla.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo al programa de becarios de estudio de posgrado del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). También se agradece el apoyo recibido por el programa PAPIT con número IN117614.

Referencias

1. Taipalus, T. and K. Kosuge. "Development of service robot for fetching objects in home environment". in *Computational Intelligence in Robotics and Automation, 2005. CIRA 2005. Proceedings. 2005 IEEE International Symposium on*. 2005.
2. Bormann, R., J. Hampp, and M. Hagele. "New brooms sweep clean - an autonomous robotic cleaning assistant for professional office cleaning". in *Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on*. 2015.
3. Meeussen, W., et al. "Autonomous door opening and plugging in with a personal robot". in *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*. 2010.
4. Iwata, H. and S. Sugano. "Design of human symbiotic robot TWENDY-ONE". in *Robotics and Automation, 2009. ICRA '09. IEEE International Conference on*. 2009.
5. Liarokapis, M.V., A.M. Dollar, and K.J. Kyriakopoulos. "Humanlike, task-specific reaching and grasping with redundant arms and low-complexity hands". in *Advanced Robotics (ICAR), 2015 International Conference on*. 2015.
6. Kunz, C., T. Willeke, and I.R. Nourbakhsh, "Automatic Mapping of Dynamic Office Environments. Autonomous Robots". **7**(2): p. 131-142.



7. Chia-Ming, W., et al. "*Human-oriented recognition for intelligent interactive office robot*". in *Control*", *Automation and Systems (ICCAS), 2013 13th International Conference on*. 2013.
8. Jain, A., et al. "*The complex structure of simple devices: A survey of trajectories and forces that open doors and drawers*". in *Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), 2010 3rd IEEE RAS and EMBS International Conference on*. 2010.
9. Endres, F., J. Trinkle, and W. Burgard. "*Learning the dynamics of doors for robotic manipulation*". in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*. 2013. IEEE.
10. Milighetti, G., et al. "*Visually and Force Controlled Opening and Closing of Doors by Means of a Mobile Robot Arm*". in *Robotics; Proceedings of ROBOTIK 2012; 7th German Conference on*. 2012.
11. Nosan, K., H. Arisumi, and K. Yokoi. "*Visual recognition of a door and its knob for a humanoid robot*". in *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*. 2011.
12. Arisumi, H., K. Nosan, and K. Yokoi. "*Systematic touch scheme for a humanoid robot to grasp a door knob*". in *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*. 2011.
13. Adiwahono, A.H., et al. "*Automated door opening scheme for non-holonomic mobile manipulator*". in *Control, Automation and Systems (ICCAS), 2013 13th International Conference on*. 2013.
14. Ahmad, S., H. Zhang, and G. Liu, "*Multiple Working Mode Control of Door-Opening With a Mobile Modular and Reconfigurable Robot*". *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013. **18**(3): p. 833-844.
15. Chitta, S., B. Cohen, and M. Likhachev. "*Planning for autonomous door opening with a mobile manipulator*". in *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*. 2010.
16. Sturm, J., C. Stachniss, and W. Burgard, "*A probabilistic framework for learning kinematic models of articulated objects*". *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2011: p. 477-526.
17. Katz, D. and O. Brock, "*Extracting planar kinematic models using interactive perception*", in *Unifying Perspectives in Computational and Robot Vision*". 2008, Springer. p. 11-23.
18. Alshahrani, S., H. Diken, and A. Aljawi. "*Optimum trajectory function for minimum energy requirements of a spherical robot*". in *The 6th Saudi Engineering Conference*. 2002.



Diseño y construcción de un robot móvil tipo Rocker-Bogie con reducción de elementos motrices

Aguilar-Loreto O., Muñoz-Gómez J. A., Rolón-Puente F. D.

Departamento de Ingenierías, CUCSur, Universidad de Guadalajara
Av. Independencia Nacional 151, C.P. 48900, Autlán de Navarro, Jalisco, México
Tel. 01 (317) 3825010 Ext. 57087

Resumen

En el presente trabajo se aborda el diseño y construcción de un sistema robótico móvil basado en la arquitectura Rocker-Bogie, se incorpora un sistema de transmisión mecánica mediante bandas de sincronización que reduce el número de actuadores y de componentes electrónicos. Se disminuye considerablemente el peso del sistema robótico para que pueda desempeñar sus acciones de movimiento con un uso de energía mínimo. Dicho sistema robótico es controlado mediante una aplicación que puede ser instalada en dispositivos con S.O. Android, la cual se comunica con el controlador del robot (Arduino UNO) mediante una conexión vía bluetooth maestro-esclavo. La aplicación incluye dos modalidades de control: por comandos de voz y control manual.

Palabras clave: Rocker-Bogie, robot móvil, sistema de transmisión mecánica.

1. Introducción

Los sistemas robóticos móviles han tomado un papel fundamental en labores de gran importancia para el ser humano como la exploración empleando sistemas autónomos o controlados remotamente. Estos robots asumen el riesgo de aventurarse en entornos en los que el ser humano no tiene alcance o son de alto riesgo. Para ello se deben cumplir con ciertas características mecánicas y de control en función de la tarea que va realizar y del entorno al cual va a ser sometido con todas las posibles circunstancias y perturbaciones a las que se pueda enfrentar. El diseño del sistema robótico móvil propuesto está pensado para afrontar uno de los problemas con los que todo robot autónomo diseñado para entornos cerrados (fuera del alcance de la radiación solar) suele enfrentarse; el consumo energético.

La gran mayoría de robots móviles desplazados por ruedas utilizan un sistema de locomoción que incluye un conjunto de motores independientes para cada rueda, lo que puede generar una demanda energética muy elevada y un sistema de control más complejo, ocasionando que el robot móvil tenga un tiempo más corto de funcionamiento y sea más pesado por el número de componentes integrados [1] [3].

En este trabajo se diseña una plataforma robótica terrestre de cuatro ruedas, basada en robots móviles tipo Rover, con un sistema de transmisión mecánica que emplea únicamente dos motores para transmitir movimiento a cada par de ruedas laterales respectivamente, logrando así optimizar el sistema de control y reducir la demanda energética. Tal característica permite ampliar las funciones que el móvil podrá realizar en un determinado tiempo, así como reducir el número de componentes electromecánicos necesarios para su control.

Sistema de suspensión Rocker-Bogie

El sistema de suspensión Rocker-Bogie ha sido adoptado en proyectos para vehículos de exploración espacial por la NASA, siendo el Mars Rover Sojourner el primer robot móvil al que se integró dicho sistema [1]. La estructura está formada por dos partes principales; una parte conocida como "Rocker" que consiste en una pieza triangular la cual posee en uno de sus vértices inferiores una unión articulada con un grado de libertad para incorporar la segunda pieza principal. La segunda parte es conocida como "Bogie" que está formada por una forma triangular y unida a la estructura Rocker en el vértice articulado con el vértice superior del Bogie. Salvo el vértice superior del Rocker, los vértices libres de unión están dotados de ruedas que se ajustan al terreno, véase figura 1 [2] [3].

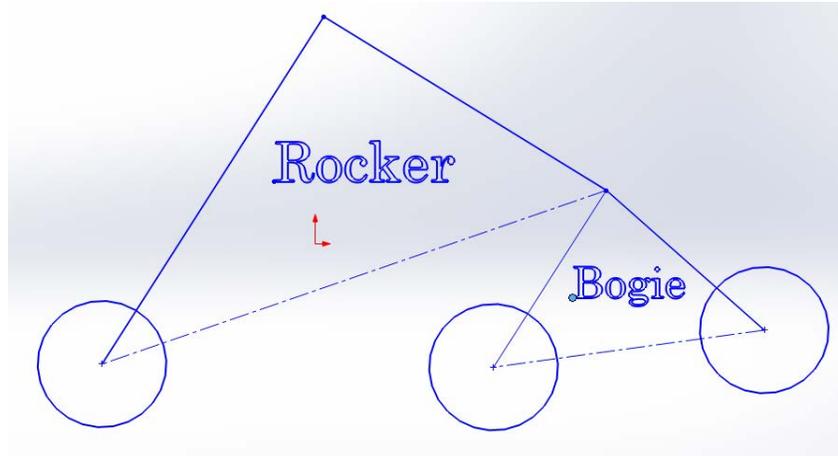


Figura 50. Diagrama cinemático del mecanismo Rocker-Bogie.

En el modelo tradicional ambas partes "Rocker-Bogie" van unidas mediante un mecanismo diferencial que ayuda a disminuir el balanceo al chasis del robot ante los cambios bruscos del terreno. Otra de las características con la que cuenta el mecanismo es que está diseñado con una geometría que le permite distribuir la carga total del sistema robótico a cada una de las seis ruedas, esto garantiza condiciones de trabajo igualitaria para cada motor y que todas las ruedas mantengan contacto con el suelo, aspecto que es de vital importancia en los casos en los que la fricción le permita escalar obstáculos [1] [4].

2. Análisis cinemático y geométrico del modelo propuesto

El primer paso para la construcción del robot móvil consiste en diseñar un sistema de transmisión de tal manera, que el número de elementos no afecten el funcionamiento en la locomoción. Para ello se ha simplificado el sistema de suspensión del Rocker-Bogie implementando solamente un brazo basculante por cada lado lateral del chasis.

Como se observa en la figura 2 el chasis se encuentra fijo mediante juntas rotacionales a ambos eslabones, el centro de masa asegura que se encuentre en dirección de la fuerza que ejerce la gravedad.

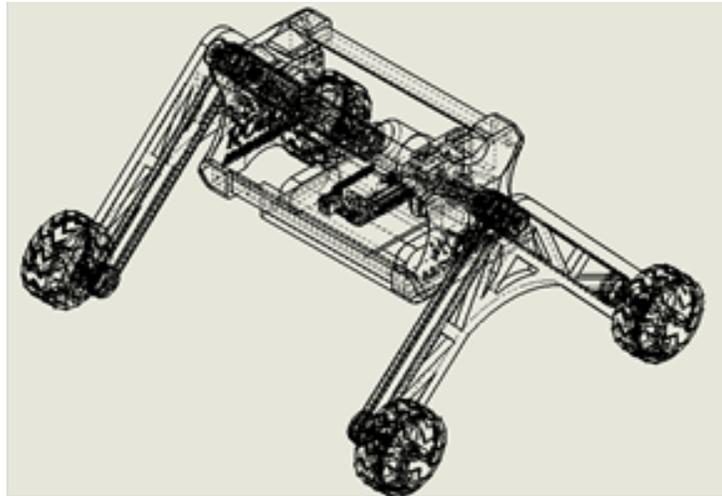


Figura 2. Diagrama mecánico el modelo propuesto.

Para el análisis del comportamiento de nuestro sistema de suspensión ante distintas condiciones del entorno, se asume que el robot se encuentra sobre un terreno plano con una discontinuidad en forma de escalón como se muestra en la figura 3.

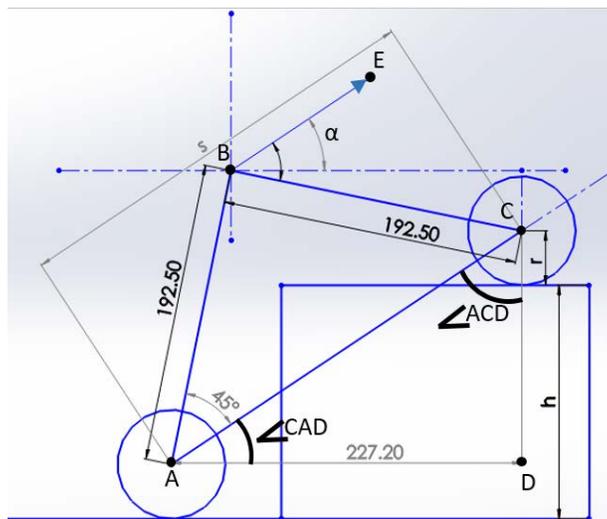


Figura 3. Parámetros cinemáticos del modelo propuesto.

Se toma el vector de dirección \overline{BE} para tener una referencia del valor del ángulo de rotación α ante determinado obstáculo (en la figura se hace referencia a un obstáculo cuadrado idealizado para mayor exactitud en el vector de ángulo de rotación), donde

$$\alpha = \sphericalangle CAD \tag{1}$$

Por ser ángulos correspondientes entre paralelas, ya que $\overline{AC} \parallel \overline{BE}$ y $\overline{AD} \parallel \overline{BF}$, de tal modo que



$$\cos \angle ACD = \frac{\overline{CD}}{\overline{AC}} \Rightarrow \angle ACD = \cos^{-1} \left(\frac{\overline{CD}}{\overline{AC}} \right) \quad (3)$$

$$\angle CAD = 90 - \cos^{-1} \left(\frac{\overline{CD}}{\overline{AC}} \right) \quad (4)$$

El ángulo α proporciona un punto de localización y reemplaza al objeto como un todo para cálculo de posicionamientos. Asimismo, el punto B representa al móvil como un objeto puntual, donde los grados de libertad internos se pueden despreciar para considerar sólo los movimientos traslacionales y rotacionales globales del modelo Rocker-Bogie completo.

2.1 Transitabilidad geométrica

La transitabilidad geométrica es un parámetro de utilidad que se refiere al rango máximo de altura que debe de ser valorado para que la estructura robótica evite a toda costa un obstáculo, en otras palabras, si la altura de un obstáculo en el terreno excede el valor de transitabilidad geométrica puede entrar en contacto con la estructura ocasionando algunos daños [1] [4]. Para analizar la transitabilidad geométrica, se define la distancia vertical máxima Z_t entre el pivote (punto más alto de la estructura) hasta el borde del obstáculo, la cual se determina de acuerdo con la ecuación (5) [1] [4].

El parámetro Z_t está sujeto a la condición $Z_t \leq c$ donde c representa la distancia del suelo al vehículo, h representa la altura del obstáculo, r es el radio de la rueda del móvil y s es la distancia en línea recta entre los centros de las ruedas del móvil. La figura 3 muestra un esquema de los parámetros involucrados.

$$Z_t = \frac{s}{\sqrt{\left(\frac{r\sqrt{s^2 - h^2} + (h - r)h}{(h - r)\sqrt{s^2 - h^2} - hr} \right)^2 + 1}} \quad (5)$$

$$Z_t \leq c$$

2.2 Estabilidad lateral

La estabilidad lateral también es considerada un parámetro importante en el desempeño del móvil, se calcula para encontrar el ángulo mínimo permitido en el terreno antes de que éste afecte a la estabilidad del robot y se vuelque. Para esto se utiliza el modelo geométrico (figura 4) como es recomendado en [6].

La estabilidad lateral se garantiza si el ángulo θ_{stab} es menor al ángulo máximo de inclinación α de la pendiente sobre el terreno de contacto mismos que se ilustran en la figura 4 [1]. El ángulo θ_{stab} se calcula

$$\theta_{stab} = \min(\theta_r, \theta_l) \quad (6)$$

La estabilidad lateral se garantiza, si y solo si

$$\theta_{stab} \geq \alpha \quad (7)$$

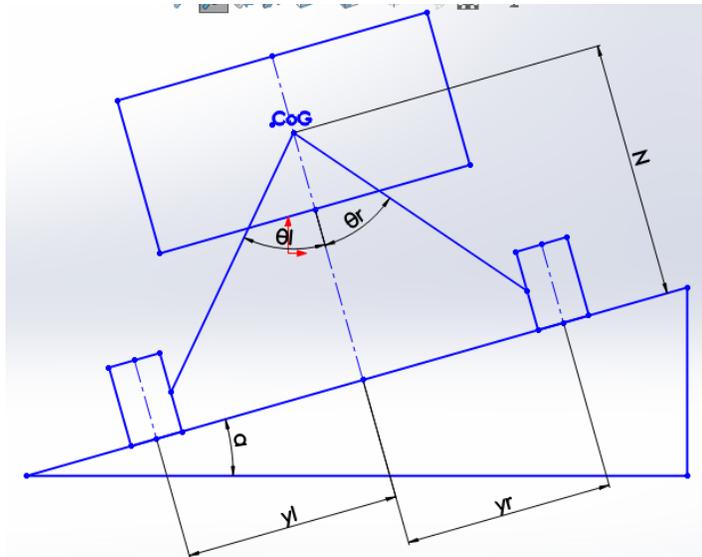


Figura 4. Modelo geométrico para el cálculo de la estabilidad lateral.

2.3 Distribución de las cargas

La distribución de la carga asegura condiciones de trabajo igualitaria para cada una de las ruedas sobre la que se sostiene el sistema robótico, la figura 5 describe las fuerzas relevantes que actúan en cualquier instante en que el robot se encuentra en movimiento, estas son las cargas o pesos G , las fuerzas normales N y las fuerzas de tracción T [5]. En la figura 5, T_1 y T_2 corresponden a las fuerzas de tracción ejercidas en las ruedas, N_1 y N_2 corresponden a las fuerzas normales ejercidas por el suelo y G_1 y G_2 corresponden a las cargas o pesos propios del cuerpo del móvil, todas ellas ejercidas en las ruedas 1 y 2 respectivamente.

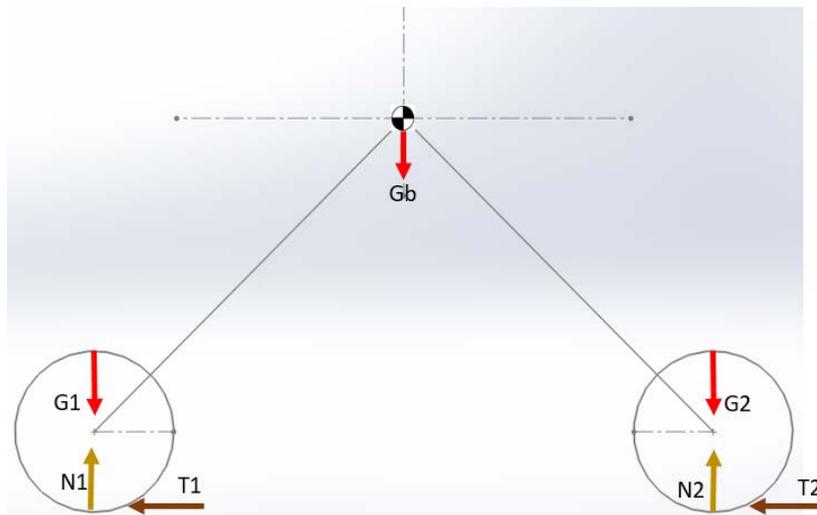


Figura 5. Diagrama geométrico de la distribución de cargas sobre las ruedas.



La carga G_b , es la carga total del mecanismo, proveniente de su centro de masa, la cual se distribuye de manera uniforme por ambos perfiles del eslabón debido a su geometría y se generan unas fuerzas G_i que denotan las cargas respectivas en cada rueda.

3. Transmisión movimiento mediante elementos flexibles

La transmisión por banda, por su elasticidad y longitud en la transmisión del movimiento, tiene una función importante en la absorción de cargas de impacto y en el aislamiento de los efectos de las vibraciones [7]. En las secciones siguientes se describen los elementos de diseño y mecánicos para la selección de la banda de transmisión.

3.1 Proceso de selección de banda

Debido a que la transmisión de movimiento mediante elementos flexibles es posible a través de varios tipos de bandas, existen diversos factores que intervienen en el proceso de su selección que dependen directamente de su aplicación, tales como: potencia, par torsional, velocidad y relaciones de velocidad.

Aunado a ello, diversas configuraciones pueden satisfacer el diseño. Por ejemplo, la distancia entre ejes y el diámetro de las poleas requerido para satisfacer los parámetros de tensión de la banda son de vital importancia. Asimismo, la forma de las condiciones del medio ambiente sobre el cual va a desempeñarse. Estos requerimientos definirán el material de los elementos, en la figura 6 se muestra un diagrama de flujo que sirve como guía para la selección del tipo de banda basada en la velocidad y relación de velocidades [9].

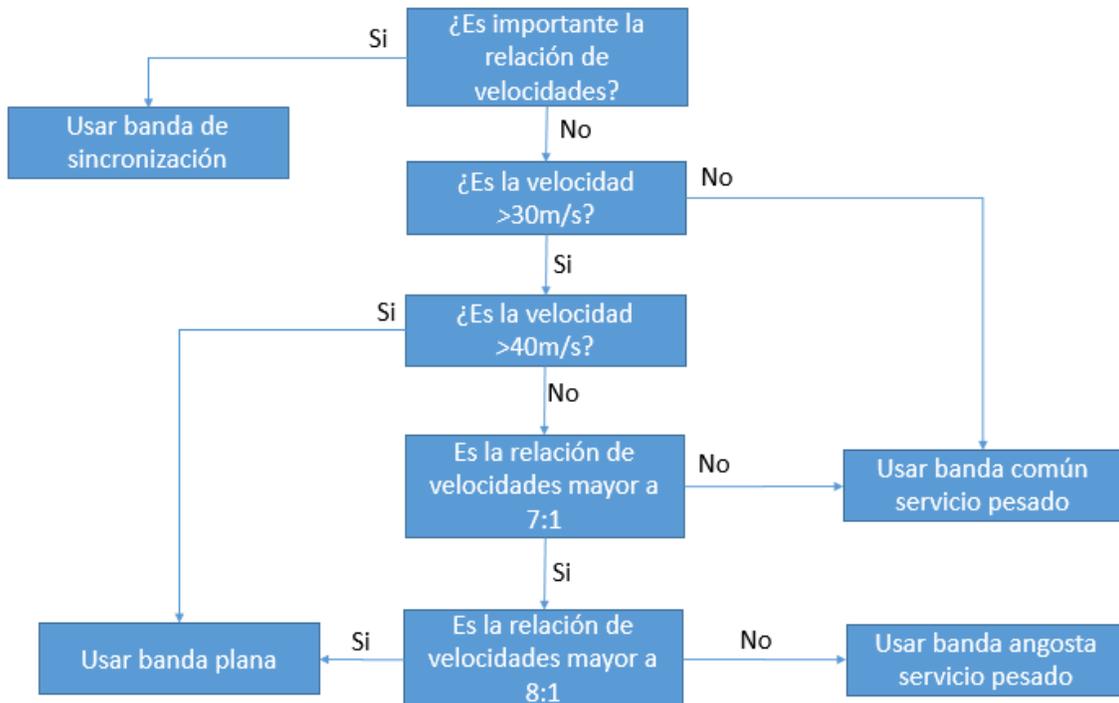


Figura 6. Diagrama de flujo para la selección del tipo de banda según la velocidad y la relación de velocidades.



La importancia de transmitir la velocidad de una manera precisa surge debido a la locomoción tipo diferencial del robot móvil, debido a que se emplea un motor para mover dos ruedas en cada uno de los dos perfiles del sistema mecánico. Además, se emplean revoluciones por minuto bajas, es por esto que se optó por usar un sistema con bandas de sincronización.

3.2 Características principales de transmisión de movimiento por bandas de sincronización

Las bandas de sincronización se fabrican con tela impregnada de caucho y alambre de acero con el propósito de resistir las cargas de tensión [9]. Son fabricadas con costillas o dientes transversales a la cara inferior de la banda que embonan en ranuras axiales formadas en la periferia de poleas conductoras o conducidas, también llamadas catarinas, y se obtiene una impulsión positiva sin deslizamiento ni estiramiento (a diferencia de bandas en V y bandas planas), por lo que transmite potencia a una relación constante de velocidad angular, por esta razón se le atribuye el nombre de banda de sincronización [10].

La acción sincrónica de este tipo de transmisión es crucial para aplicaciones de gran precisión, estas bandas pueden operar sobre un intervalo muy amplio de velocidades, tienen eficiencias en el intervalo de 97 a 99%, no requieren lubricación y son mucho más silenciosas y ligeras que las transmisiones por cadena, es por esto que se les empieza a ver más en aplicaciones que antes usaban dicha transmisión por cadena [9].

La instalación de las catarinas y las poleas dentadas requiere una holgura nominal en la distancia entre centros, para que los dientes de las bandas entren en las ranuras de las poleas sin forzarlos y después ajustar la distancia, que en el caso típico requieren menor distancia que bandas planas y tipo V, esto debido a que requieren una tensión inicial menor [10].

3.3 Características geométricas del sistema de transmisión por banda sincrónica

El diseño de un sistema de transmisión de movimiento con elementos flexibles requiere que se determinen ciertos parámetros geométricos para definir algunas medidas del mecanismo. En la figura 7 se muestra un diagrama cinemático del sistema de transmisión de movimiento del mecanismo propuesto para el robot. Como se observa, P_m corresponde a la polea central (media) ubicada en el eje de rotación del motor y que coincide con el eje de simetría del móvil, ésta se compone de dos poleas colocadas consecutivamente sobre el eje del motor e impulsa a las poleas conducidas P_{c1} y P_{c2} correspondientes a las ruedas 1 y 2 respectivamente mediante dos bandas sincrónicas.

Una de las medidas de mayor importancia es L_B que corresponde a la longitud de la banda, la cual se define en [7] mediante la siguiente ecuación

$$L_B = 2C + \frac{\pi}{2}(D_1 + D_2) + \frac{D_2 - D_1}{4C} \quad (8)$$

donde C equivale a la longitud entre los centros del vértice del eje de rotación y alguna de las ruedas, D_1, D_2 corresponde al diámetro de la rueda uno y dos respectivamente. En nuestro caso particular $D_m = D_1 = D_2$ por lo que la ecuación (8) se simplifica a

$$L_B = 2C + \pi D \quad (9)$$

lo que también implica que la relación de velocidad es directa, es decir, si $D_m = D_1 = D_2$ entonces $\omega_m = \omega_1 = \omega_2$ que es la velocidad angular media para cada una de las poleas del dispositivo móvil, véase la figura 7. Esto equivale a decir que la transmisión de la velocidad angular producida por el torque mecánico del motor es directa sin pérdidas sobre las ruedas del móvil.

La distancia entre centros C , se despeja de la ecuación (9)

$$C = \frac{L_B - \pi D}{2} \quad (10)$$

Teniendo esta aproximación teórica se facilita en gran medida el proceso de diseño mecánico y la selección de los elementos de transmisión de movimiento.

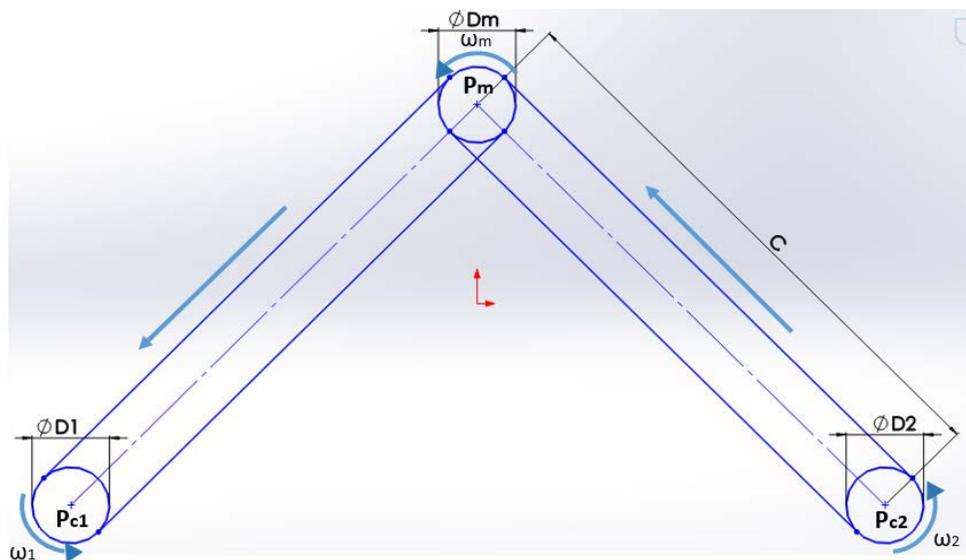


Figura 7. Diagrama cinemático del sistema de transmisión de movimiento del mecanismo propuesto.

4. Diseño mecánico

La estructura lógica para la realización de este proyecto está basada en un diagrama de flujo descrito en [12]. Este esquema es de tipo genérico y fue necesario realizar algunas adaptaciones para la elaboración del sistema robótico móvil propuesto. En la figura 8 se muestra el diagrama propuesto. En los siguientes párrafos se describe cada bloque del diagrama a flujo propuesto.

4.1 Reconocimiento de una necesidad

Este paso es en esencia el origen de la creación de un diseño o rediseño. En este caso viene relacionado directamente con la justificación del presente proyecto, que básicamente plantea una alternativa que optimizará el uso de la energía disponible de un sistema robótico móvil para realizar las tareas para las que fueron encomendados y a la vez simplificar la etapa de potencia y de control.

4.2 Especificaciones y requisitos

Habiéndose definido la necesidad, se fijaron ciertos requisitos para la integración del sistema de transmisión de potencia, los cuales fueron: no limitar el balanceo de los eslabones (rockers),

respetando las bondades que la arquitectura tipo Rover ofrece de adaptarse a terrenos irregulares. Que exista una diferencia significativa positiva entre el consumo energético del sistema robótico propuesto que hace uso de dos motores y el del modelo típico de cuatro motores individuales, tratando de disminuir lo mejor posible los esfuerzos por fricción en la transmisión mecánica.

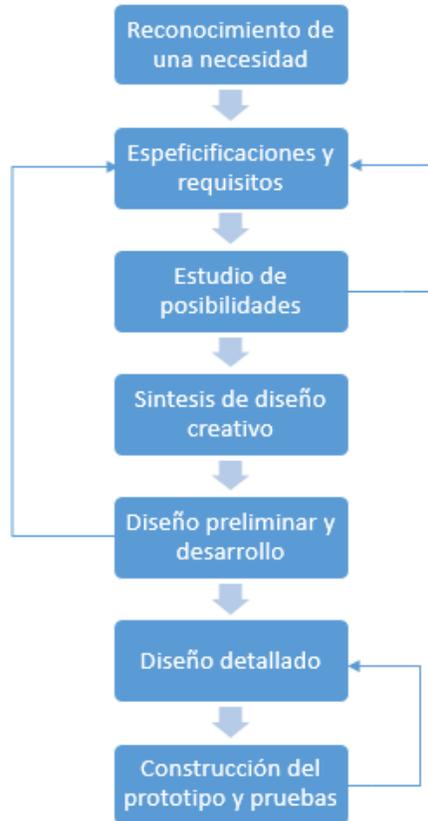


Figura 8. Diagrama de flujo del diseño.

4.3 *Estudio de posibilidades*

Después de que las especificaciones fueron determinadas, se realizó el estudio de posibilidades, el cual no arrojaba resultados muy positivos, debido a que existía una deficiencia en cuanto a la disponibilidad dentro de la región de la mayoría de materiales que posiblemente se pudieran requerir. Debido a la falta de distribuidores locales de componentes relacionados con la robótica, dando a deducir que el tiempo y costo para su elaboración sería más elevado de lo esperado. Esta parte suele ser un factor que modifica las especificaciones y requisitos con la finalidad de que el proyecto tenga una mayor probabilidad de éxito.

4.4 *Síntesis de diseño creativo*

En esta fase se comenzaron a realizar algunas modificaciones creativas y métodos para integrar el sistema de transmisión mecánica al robot móvil mediante bosquejos, buscando cumplir con las especificaciones y requisitos planteados. De esta fase salieron algunas propuestas que fueron dando forma a la siguiente fase. Cabe mencionar que inicialmente se tomó en cuenta modificar un sistema robótico basado en la arquitectura Rocker-Bogie que emplea seis ruedas.

4.5 *Diseño preliminar y desarrollo*

Después de que se ha completado la síntesis de diseño creativo se obtuvieron diferentes diseños que satisficieron algunos requisitos para la integración del sistema de transmisión. Se eligió el más viable para realizar su diseño en 3D y simulación cinemática en el software SOLIDWORKS. En la figura 10, se muestra el sistema robótico que emplea cuatro ruedas para su desplazamiento, cabe mencionar que el modelo de seis ruedas no pasó de ésta fase del diseño.

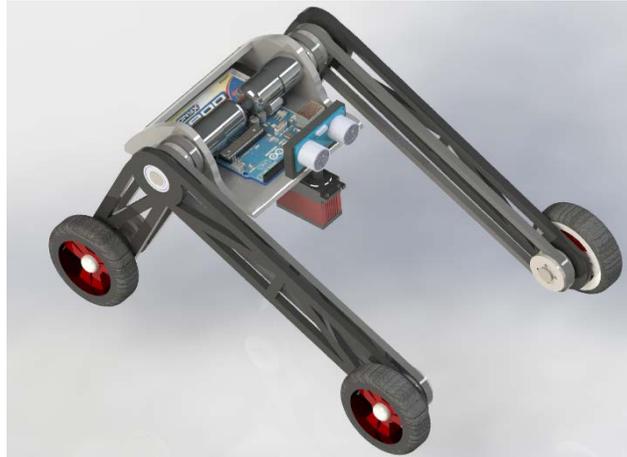


Figura 9. Diseño preliminar del robot móvil.

4.6 *Diseño detallado*

Al obtenerse el diseño preliminar obtuvimos la siguiente lista de materiales candidatos para la elaboración del prototipo:

- Lámina de acrílico de 8 mm para eslabones o rockers.
- 1kg de filamento HIPS color negro para partes del chasis (acoples, soportes de motor) y ruedas.
- 4 bandas sincrónicas de caucho.
- 8 poleas dentadas.
- 6 ejes de aluminio.
- 2 motorreductores de 12V con una relación de 30:1 con encoder.
- Arduino UNO.
- 4 escuadras de aluminio.
- 8 rodamientos de bolas.
- 1 batería de 7.2V y 3000 mAh.
- Etapa de potencia L298 DC.
- Módulo bluetooth HC-06.

Una vez adquiridos todos los materiales, se procedió a realizar el diseño detallado del robot móvil como se muestra en la figura 10. Este paso es de vital importancia debido a que permite corregir de manera anticipada los posibles errores en la etapa de construcción.

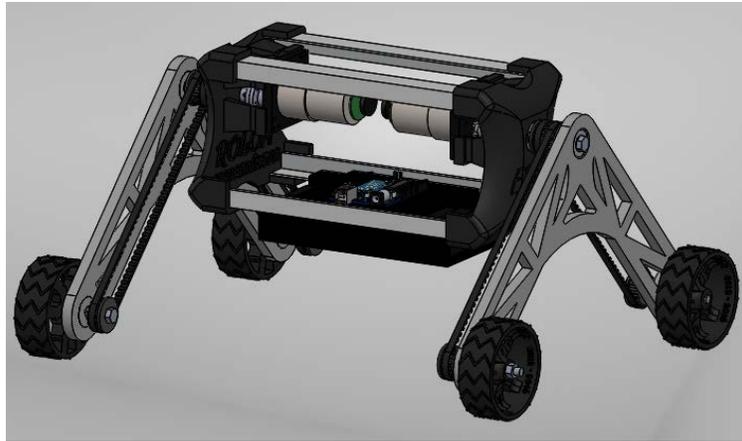


Figura 10. Diseño detallado del robot móvil, realizado en SolidWorks.

4.7 Construcción del prototipo y pruebas

El proceso de fabricación de las piezas del robot móvil se llevó a cabo mediante un diseño mecánico en el software SolidWorks como ya se explicó anteriormente.



Figura 181. Captura del prototipo real en perspectiva.

Las piezas de tipo unión, soporte estructural y llantas de tracción fueron fabricadas mediante la impresión 3D de tipo FDM con polímero HIPS en color negro como se aprecia en la figura 11. Aunado a ello, se empleó poliestireno de alto impacto como material base. Por otra parte, la tecnología de corte láser resultó muy útil para el corte en acrílico de los eslabones, estos fueron sometidos a un esfuerzo mecánico mayor por sostener el cuerpo entero del chasis. Como se aprecia en la figura 11, la fabricación digital del robot móvil es posible realizarla empleando tecnología vanguardista y conocimiento en diversos campos del diseño.



Es importante mencionar que se deben manejar impresiones-3D configuradas en la más alta precisión posible. Esto es requerido para que las piezas -como los soportes de los motores- puedan alinearse a los ejes de las poleas motrices. También es importante manejar valores de densidad de impresión-3D por encima del 75% para incrementar la resistencia a altos impactos. Por otro lado, en cuanto al control el método de comandos de voz, solo se vuelve una buena opción cuando se dispone de una señal de internet rápida y estable.

En la tabla 1 se dan a conocer los pesos de los elementos que conforman la parte física del sistema robótico.

Tabla 1. Pesos de los elementos del robot propuesto.

Pieza	Peso (gr)	Cantidad	Peso total (gr)
Soportes de motores (HIPS)	92 gr	2	184 gr
Ruedas (HIPS)	28 gr	4	112 gr
Motores	180 gr	2	360 gr
Eslabones (acrílico)	100 gr	2	200 gr
Batería	320 gr	1	320 gr
Caja de control	355 gr	1	355 gr
Sistema de transmisión (poleas, correas, rodamientos, ejes y tornillos)	584 gr	1	564 gr
Chumaceras de rodamiento de poleas conducidas	12 gr	4	48 gr
Chumaceras de rodamientos de poleas motrices	11 gr	2	22 gr
<i>Peso total del robot</i>			2,165 gr



Es muy importante mencionar que se han utilizado dos motorreductores de 12V con una relación de 30:1 con encoder lo que equivale a 360 gramos de peso, en los diseños convencionales de robots tipo rocker-bogie, se utilizan hasta 6 motores que proporcionan un peso equivalente hasta de 1360 gramos ver por ejemplo [3], Aunado a ello los componentes del sistema de transmisión reúnen un peso hasta de 564 gramos debido a que están constituidos por materiales ligeros. La suma de los dos motoredutores y el sistema de transmisión suman hasta 924 gramos de peso. Si consideramos únicamente la parte dinámica basada en 6 motores de los robots rocker-bogie estándar en comparación con los dos motoredutores y el sistema de transmisión en conjunto, la diferencia en peso es de casi 0.5 kilogramos, observe la tabla 2.

Tabla 2. Diferencia en peso del Sistema Motriz comparado con robot tipo Rocker-Bogie estándar.
(1) Modelo de Robot y motores propuestos en [3]

Pieza	Peso (gr)	Cantidad	Peso total (gr)
Motores Robotzone 12V 750 oz-in⁽¹⁾	226.8 gr	6	1360.8 gr
motorreductores de 12V con una relación de 30:1 con encoder	180 gr	2	360 gr
Sistema de transmisión (poleas, correas, rodamientos, ejes y tornillos)	584 gr	1	564 gr
<i>Diferencia en peso</i>			436.8 gr

Además, cabe resaltar el uso de materiales de fabricación en impresión 3D que aportan suficiente ligereza al móvil, como se puede apreciar en la tabla 1, el uso de plástico HIPS en la impresión 3D para los soportes de motores y las ruedas, reducen considerablemente el peso del dispositivo. En el caso del modelo propuesto por [3] y de la mayoría de móviles tipo rocker-bogie se consideran ruedas de aluminio que incrementan el peso del robot.

Para concluir con la etapa de pruebas dinámicas del mecanismo, se empleó una aplicación para Android programada en el software MIT app inventor 2.0. Con este software es posible enviar comandos de control al microcontrolador Arduino por medio de comunicación bluetooth, dichos comandos fueron condicionados dentro del código fuente del entorno de programación de Arduino para controlar las acciones básicas de movimiento del robot móvil, estas acciones son: desplazamiento frontal, reversa, girar hacia la izquierda, girar hacia la derecha y detenerse. Estas acciones son llamadas mediante palabras clave usando la técnica de reconocimiento de voz, la figura 12 muestra una tabla con los comandos y las palabras claves utilizadas para ejecutar las acciones correspondientes.



Comandos de voz	Comandos de control manual	Carácter	Accionamientos de control
Avanza	Flecha arriba	1	Desplazamiento frontal
Detente	Flecha abajo	2	Detenerse
Izquierda	Flecha curvada hacia la izquierda	3	Girar a la izquierda
Derecha	Flecha curvada hacia la derecha	4	Girar a la derecha
Retrocede	Botón stop	5	Reversa

Figura 151. Tabla de comandos de control.

Como se observa en la figura 13, la interfaz de control tiene un botón en la parte superior llamado "CONECTAR". Tiene la función de seleccionar el dispositivo al cual conectarse. La interfaz de control se compone de dos tipos de mando: el modo de reconocimiento de voz y el modo manual. Es importante señalar que se inició solamente con el modo de mando de voz, pero como éste requiere de acceso a internet y depende de la velocidad de transferencia de datos, se agregó el modo manual, el cual puede intervenir directamente en el uso del comando de voz. Cabe aclarar que el control manual contiene los mismos comandos que el control con voz.



Figura 13. Interfaz de control.



5.8 CINEMATICA DEL ROBOT

Una vez integrado el sistema de control al robot, se realizaron pruebas cinemáticas para definir su rendimiento. Se le colocó sobre un terreno liso y se activaron ambas unidades motrices a su velocidad máxima (350 RPM), esto equivale a 4.620 km/h, los resultados se muestran en la figura 14.

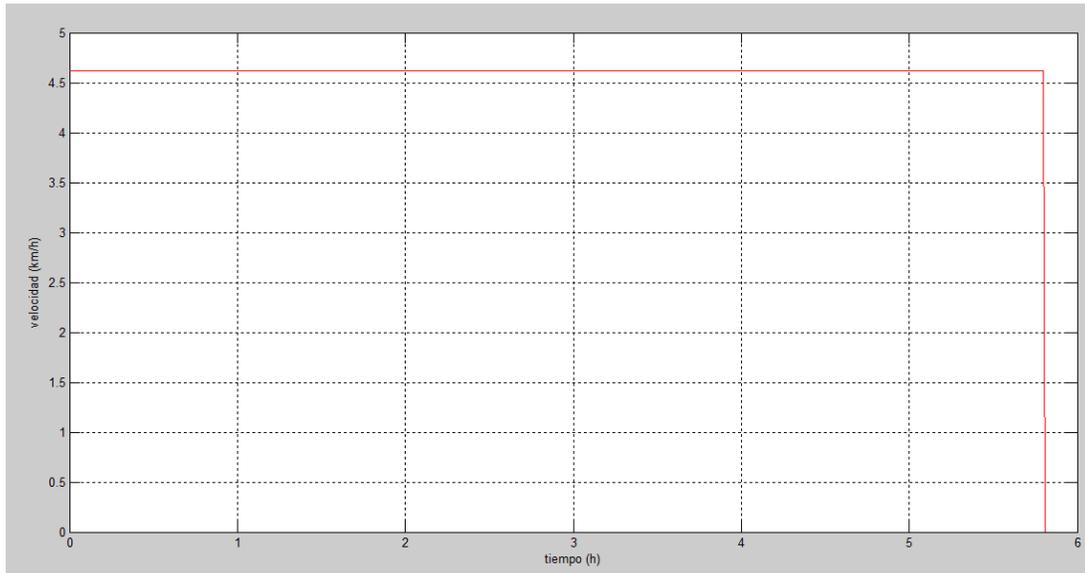


Figura 14. Grafica de velocidad vs tiempo

Como se puede apreciar en la figura 14, el tiempo de trabajo del sistema robótico en continuo es de aproximadamente 5.88 horas hasta el momento en que la batería ha sido totalmente descargada. La distancia recorrida D es representada como el área bajo las líneas que delimitan la gráfica, es decir

$$D = \Delta v \times \Delta t \quad (11)$$

Donde v es la velocidad a la que se desplaza el robot y t es el tiempo de duración del desplazamiento, dando como resultado

$$D = (4.620 - 0) \text{ km/h} \times (5.88 - 0) \text{ h} \Rightarrow D = 27.1656 \text{ km} \quad (12)$$

En la figura 15 se muestra una descripción grafica de los resultados del estudio dinámico de la distancia recorrida en el tiempo límite de la energía disponible para el sistema robótico (3000mA). Como es sabido de cinemática la gráfica corresponde a una línea recta debido a que el movimiento es uniforme a velocidad constante, la pendiente de la línea recta corresponde a la velocidad promedio a la que se desplaza el móvil.

A partir de este análisis es propio definir los factores implicados en el consumo energético P que se emplea solamente en los motores de accionamiento, según lo propuesto en [11] se denota como

$$P = \frac{R_M g_M^2}{K_t^2} \sum_{i=1}^n \Gamma_i^2 \quad (13)$$

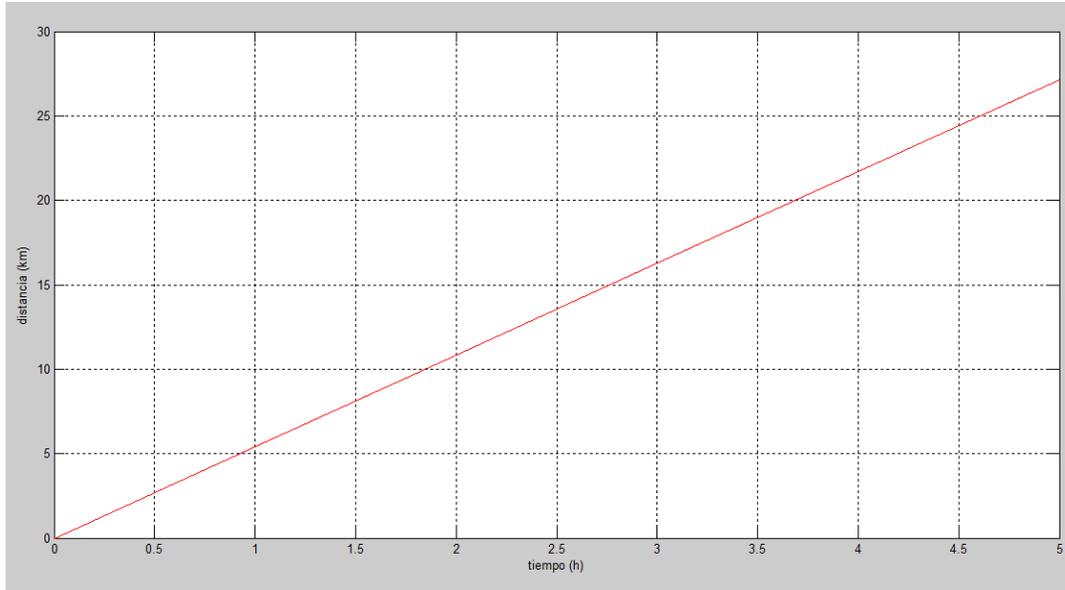


Figura 15. Grafica de desplazamiento vs tiempo.

Donde R_M es la resistencia de los motores, g_M es la relación de transmisión de los motores, K_t es la constante de par torsional de los motores y Γ_i corresponde al torque que es aplicado al i -ésimo motor. De la ecuación (13) se observa que el consumo energético es directamente proporcional a la suma de los cuadrados de los pares torsionales aplicados a cada motor, matemáticamente el consumo y potencia de energía empleado por el móvil es proporcional al número de unidades motoras empleadas en el móvil, en el trabajo que se ha realizado se ha considerado como variable principal a reducir las unidades motoras que debe emplear el sistema móvil, mismo que se ha reducido en este trabajo al mínimo requerido para cada brazo móvil del dispositivo de un solo motor.

5. Conclusiones

En este trabajo se presentó el diseño y construcción de un robot móvil para terrenos no-uniformes basado en la arquitectura Rocker-Bogie. Mediante las técnicas de fabricación digital contemporáneas fue posible transitar del diseño al producto, empleando para ello máquinas de corte láser e impresoras 3d. El robot mostró un correcto desempeño en diferentes situaciones, logrando ser controlado por comandos de voz y en forma directa. Además, se observó un funcionamiento estable en terrenos difíciles. El análisis cuantitativo realizado permite concluir dos aspectos: Al reducir el peso del modelo propuesto, provoca una disminución en el consumo energético comparado con los dispositivos tipo Rocker-Bogie estándares de seis ruedas, como fue demostrado en la gráfica de velocidad vs tiempo de la figura 14, el tiempo de funcionamiento fue óptimo considerando que cada motor requiere una corriente de 300 mA y son alimentados con una batería de 3000 mAh; además, la reducción en el consumo energético permite lograr un mayor desempeño en el alcance terrestre como se puede apreciar en la relación 12 considerando a su vez la velocidad nominal de



acoplamiento de los motores, tal como se indica en la gráfica 15. Asimismo, la reducción del número de motores permite una disminución en el número de componentes de control y de acoplamiento mecánico, este hecho permite que el modelo propuesto tenga un grado de eficiencia considerable con respecto a aquellos modelos basados en arquitectura tipo Rocker-Bogie estándares.

Referencias

- [1] Ullrich F., Goktögan A., Sukkarieh S., “*Design Optimization of a Mars Rover’s Rocker-Bogie Mechanism using Genetic Algorithms*”, Australian Centre for Field Robotics (ACFR), J04, University of Sydney, PP 199-210, 2006.
- [2] Yadav N., Bhardwaj B., Bhardwaj S., “*Design analysis of Rocker Bogie Suspension System and Access the possibility to implement in Front Loading Vehicles*”, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, PP 64-67, 2015.
- [3] Quezada D., Olmedo F., Tipán E., “*Diseño y construcción de un robot todo terreno utilizando el sistema rocker-bogie y teleoperado inalámbricamente para el laboratorio de robótica de la universidad de las fuerzas armadas – espe*”, Departamento, Ciencias de la Energía y Mecánica, Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, Ecuador, Sangolquí, PP 1-16, 2014.
- [4] Hacot H., Dubowsky S., Bidaud P., “*Analysis and simulation of a rocker-bogie exploration rover*”, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, PP 1-8, 1998.
- [5] Li S., Gao H., Deng Z. “*Mobility performance evaluation of lunar rover and optimization of rocker-bogie suspension parameters*”, Systems and Control in Aerospace and Astronautics, pp. 1-6, 2008.
- [6] Thuer T., “*Mobility Evaluation of Wheeled all-terrain Robots - Metrics and Application*”, PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH Zurich), pp 1-130, 2009.
- [7] Deutschman A., Michels W., Wilson C. “*Diseño de máquinas-Teoría y Práctica*”. Editorial Continental S.A. de C.V., México, segunda edición, 1987.
- [8] Ramírez J. “*Diseño de elementos flexibles para la transmisión de potencia mecánica mediante el uso de la computadora*”. Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica, pp. 18-23, UANL, 2000.
- [9] Shigley J. E., Shigley C., Mischke C. “*Diseño en ingeniería mecánica*”. McGraw-Hill, México, octava edición, 1990.
- [10] Mott R. “*Diseño de elementos de máquinas*”. Pearson Educación, cuarta edición, México, 2006.
- [11] Iagnemma, K. and Dubowsky, S., “*Traction control of wheeled robotic vehicles in rough terrain with application to planetary rovers*”, The International Journal of Robotics Research, Vol. 23, No. 10-11, 2004, pp. 1029.



Control a distancia de un dispositivo háptico

Gudiño Lau Jorge, Durán Fonseca Miguel, Ríos Cortes Felipe, Charre Ibarra Saida y
Alcalá Rodríguez Janeth.

Facultad de Ingeniería Electromecánica, Universidad de Colima.
Km. 20.5 carretera Manzanillo-Cihuatlán, Tel. 01 31 43 31 12 07
E-mail: jglau@ucol.mx

Resumen

Este trabajo resuelve el problema de manipular robots a distancia empleando la internet como medio de comunicación entre ambos manipuladores, con el objetivo de ayudar a los seres humanos cuando ejecutan tareas complejas y peligrosas. Por lo anterior, este trabajo muestra el diseño de un sistema manipulado a distancia que permite la retroalimentación de posición angular de un dispositivo háptico. Este diseño está formado por dos dispositivos hápticos novint falcon, que son manipulados por un control supervisor, es decir, el manipulador esclavo es controlado por un control no lineal (proporcional derivativo con compensador de gravedad PD+G) y el manipulador maestro envía la señales de posición angular o cartesiana. También se presenta la configuración de la red para la telecomunicación entre los dispositivos. La programación se desarrollo en Matlab, tanto para la comunicación como el control. Además, los resultados experimentales de la teleoperación son mostrados en este artículo, para demostrar que la comunicación funciona correctamente, así como el control.

Palabras claves: Teleoperación, dispositivos hápticos, robots manipuladores, control no lineal.

1. Introducción

La teleoperación es el control de un manipulador robótico a distancia, a través de un dispositivo que es manipulado por el ser humano.

La teleoperación está formado por dos manipuladores robóticos (uno maestro y otro esclavo), una vía de comunicación y dos computadoras. El manipulador esclavo está controlado por el usuario, por medio de un algoritmo de control.

Una parte importante en la teleoperación es el control supervisado, el manipulador esclavo puede hacer las tareas de forma automática, mientras que el operador monitorea y envía posiciones angulares o cartesianas, para que el manipulador remoto los ejecute, este tipo de sistemas son actualmente los más usados y estudiados, ya que permiten utilizar modelos virtuales, estimar parámetros entre otras cosas. Un ejemplo claro de este tipo de control se aprecia en [1], como se observa en la figura 1.

En 1947 nacen las primeras investigaciones referentes a teleoperación. En 1948 se obtuvo el desarrollo del primer manipulador teleoperado mecánico, denominado M1. Ambos manipuladores eran prácticamente iguales, como se muestra en la figura 2. [2]

En los años 50 se obtuvieron las primeras investigaciones dirigidas a motorizar ambos manipuladores, maestro y esclavo. En 1954 Goertz presenta el primer manipulador maestro-esclavo con accionamiento eléctrico y servocontrol en ambos manipuladores conocido como E1, tal como se observa en la figura 3. [2]

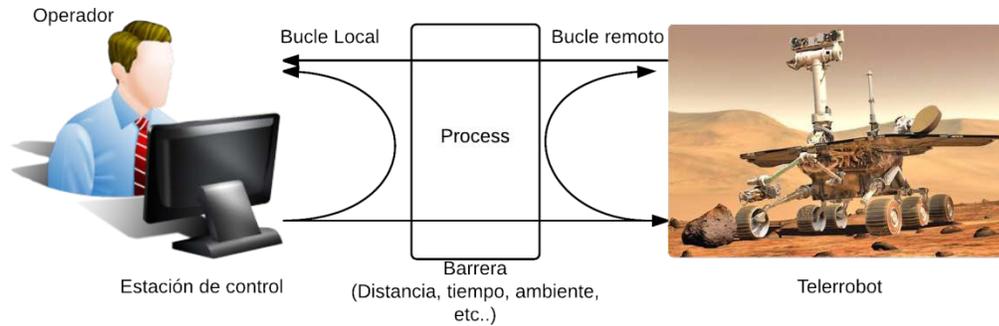


Figura 1. Esquema de Control Supervisado en la teleoperación

En los años sesenta se presentan las primeras investigaciones en el campo de las aplicaciones submarinas. A finales de los años sesenta y principios de los setenta, la tecnología de la teleoperación alcanza su mayor auge con la utilización de aplicaciones espaciales [3].

Actualmente se ha tenido avances importante en la aplicación de las tecnologías de la teleoperación al sector médico [4]. Desde los primeros desarrollos de prótesis o dispositivos de asistencia a discapacitados hasta la más novedosa de la telecirugía, o el telediagnóstico, aunque este no pertenezca estrictamente al sector de la teleoperación.

El trabajo de Fung [5], con una teleoperación con control bilateral. La técnica remota consiste en un Robot PUMA 560 montado sobre un robot móvil Nomadic XR4000, wireless LAN, un ordenador y una cámara de video; y la técnica local es una GUI que da realimentación visual al usuario, el usuario manipula el robot mediante un joystick con realimentación de fuerza.

El trabajo de Alvarado [6], "Diseño de Brazo Manipulador Háptico Teleoperado", presenta el diseño de un sistema robótico que permite la retroalimentación háptica de un brazo manipulador teleoperado.

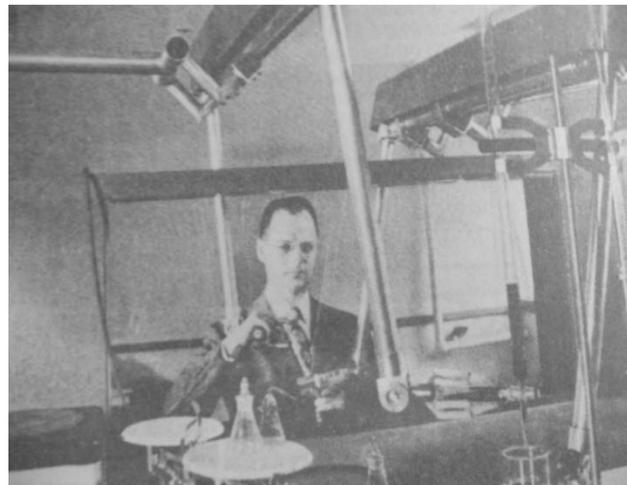


Figura 2. Primer telemanipulador maestro-esclavo mecánico.

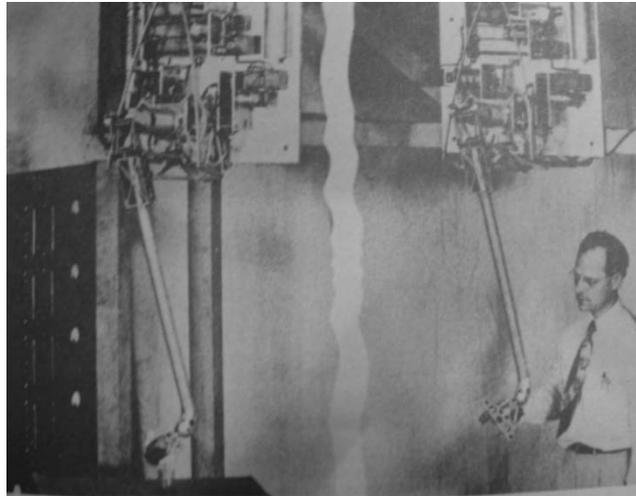


Figura 3. Primer telemanipulador maestro-esclavo eléctrico.

2. Desarrollo

Este trabajo presenta un sistema de teleoperación formado por dos dispositivos hápticos Omni Phantom, uno se denomina maestro y otro como esclavo. El Omni maestro envía su posición angular, a través de internet bajo el protocolo TCP/IP desde la computadora cliente, y el Omni esclavo la recibe desde la computadora servidor y la reproduce. La conexión, envío y recibo de datos vía internet se llevó a cabo en Matlab y Simulink. El sistema de teleoperación con el que se trabaja se muestra en la figura 4.

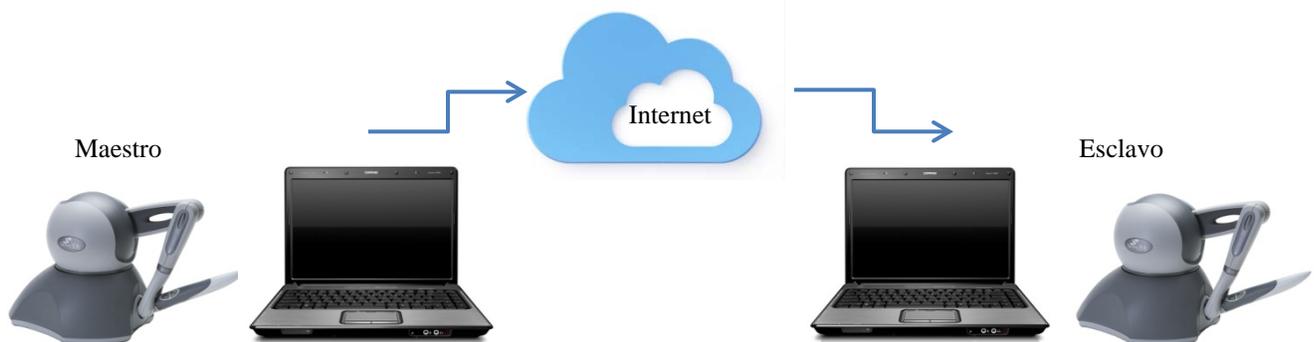


Figura 4. Sistema de teleoperación

2.1 Software

Para realizar la teleoperación es necesario contar con software especializado y de vanguardia, como:

- Sistema operativo windows7 o versiones más actuales a esta.
- Matlab 2014 o versiones más actualizadas, siempre y cuando sean para 32 bits.
- Visual Studio
- Driver del adaptador USB del cable de red del Omni (Driver_USB)
- Controladores del Omni: -Geomagic_Touch_Device_Driver_2014
- OpenHaptics_Academic_3.1
- Librería "Haptik library" (puede descargarse en la página web www.haptiklibrary.org)



2.2 Comunicación

Para la comunicación en la teleoperación se utiliza el protocolo TCP/IP. Los estándares del protocolo TCP/IP son abiertos y ampliamente soportados por todo tipo de sistemas, es decir, se puede disponer libremente de ellos y son desarrollados independientemente del hardware de los ordenadores o de los sistemas operativos.

Para llevar a cabo la teleoperación se utilizan dos computadoras, una que cumpliera con el rol de cliente y otra como servidor. Para ello se crearon en el entorno de Matlab los programas que establecen la conexión TCP/IP, el envío y recibo de datos (posición del Omni Phantom).

2.2.1 Conexión

En los programas para establecer la conexión entre cliente y servidor, se utilizaron las funciones `tcpip()` y `fopen()`.

Tcpip()

Esta función crea un objeto TCPIP y además se declara:

- ✓ La IP de la computadora remota
- ✓ El puerto remoto
- ✓ "NetworkRole", que activa el soporte para sockets de servidor, usando dos valores, "client" o "server" para establecer una conexión como cliente o servidor.

Fopen():

Esta función conecta el objeto TCPIP al host.

2.2.2. Servidor

Para el programa del servidor se utiliza la función `tcpip()` configurándose de la siguiente manera:

```
conexión02=tcpip('148.213.117.20', 4013,'NetworkRole','server');
```

De esta forma, se crea un objeto TCPIP, `conexión02` (declarado como variable global), como una interfaz de servidor para poder establecer un medio para la comunicación, específicamente esta función habilita el puerto 4013 de la dirección IP '148.213.117.20' y también asigna el "server" para establecer la conexión como servidor.

Para conectar el objeto "conexión02" con el cliente con IP '148.213.117.20' establecido en la función `tcpip()`, se utilizó la función `fopen()` de la siguiente manera:

```
% Configuración y conexión
disp('Receiver started');

conexion02=tcpip('148.213.117.21', 4013,'NetworkRole','server');

% Espera la conexión
disp('Waiting for connection');

fopen(conexion02);
```



```
disp('Connection OK');
```

2.2.3. Cliente

Para el programa del cliente se utiliza la función `tcip()` configurándose de la siguiente manera:
`conexion = tcip('148.213.117.21',4013);`

Esta instrucción crea un objeto TCPIP, `conexion` (declarado como variable global), como una interfaz de cliente, específicamente esta función habilita el puerto 4013 de la dirección IP '148.213.117.21'. Para conectar el objeto "conexion" con el servidor con IP '148.213.117.21' establecido en la función `tcip()`, se utiliza la función `fopen()` como:

```
% Configuración y conexión
conexion = tcip('148.213.117.21',4013);

% Apertura del socket y envío de información
fopen(conexion);

disp('Connection OK');
```

2.2.4. Lectura y escritura de posición del dispositivo háptico

La lectura y escritura de posición del Omni Phantom se llevó a cabo con la ayuda de la librería Haptik Library. Esta librería proporciona las posiciones del Omni o permite que estas se puedan manipular, para que el omni Phantom se dirija a la posición que se desee. En la figura 5 muestra la lectura de posición angular en simulink del programa "Envío" y la figura 6 muestra la escritura del programa "Recibo", en ambos casos se utiliza el bloque `haptik_simulink` (de la librería Haptik).

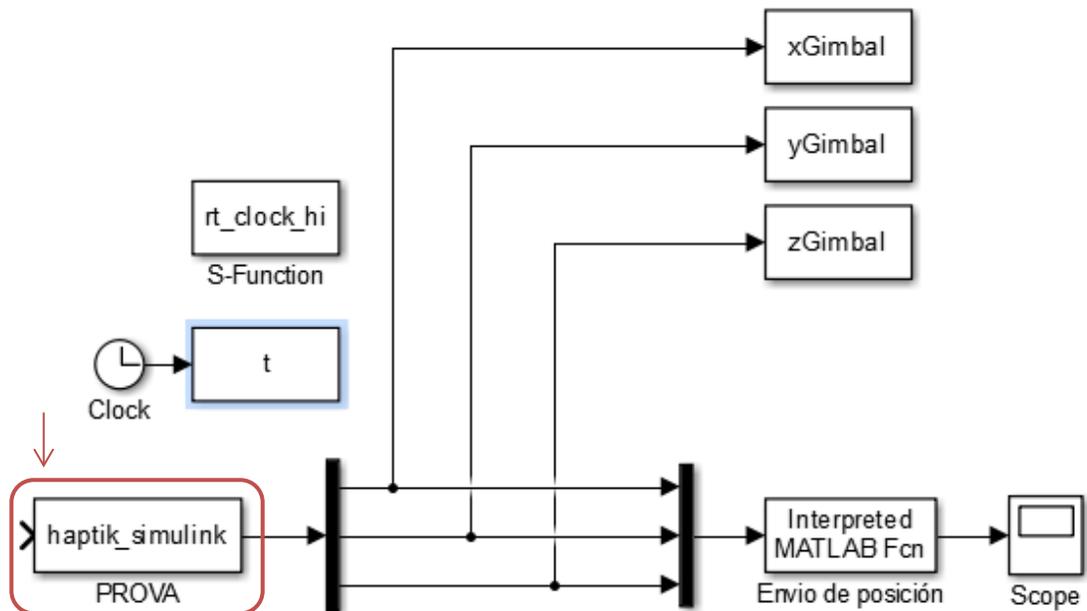


Figura 5. Lectura de posición, programa Envío

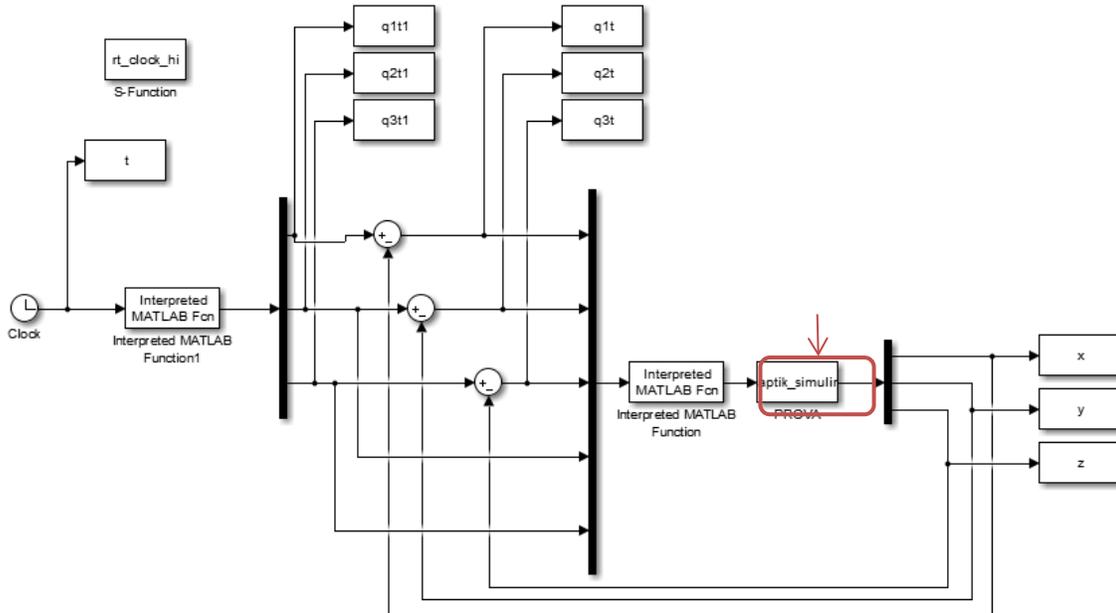


Figura 6. Escritura de posición, programa Recibo

2.2.5. Envío y recibo de datos

Para el envío y recibo de posiciones (datos), se crean dos programas en simulink. El programa para el envío se ejecuta desde la computadora cliente y el que recibe datos desde el servidor. Los dos llaman a través del bloque "Interpreted MATLAB function" a su respectiva función de envío o recibo de datos.

Envío de datos

La figura 7 muestra el programa que realiza el envío de posición del dispositivo háptico, se observa que el bloque "Interpreted MATLAB function", recibe los datos de posición desde el bloque "haptik_simulink", los cuales se envían con la función "envios02".

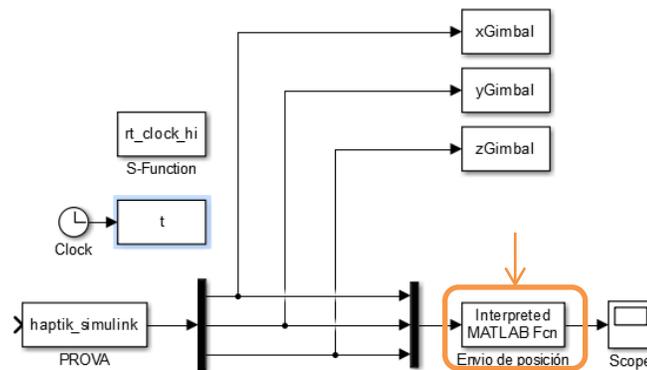


Figura 7. Envío de datos



Función envios02

Se programa una función llamada envios02 que es ejecutada por el bloque “Interpreted MATLAB function”. Ésta realiza el envío de posiciones de la siguiente manera:

- Recibe la posición del Omni proporcionada por el bloque haptik_simulink
- Verifica si es la primera vez que se enviarán los datos
- Si es así, envía la posición al servidor.
- Si no, evalúa si hubo un cambio de posición.
- Si hubo cambios, envía la nueva posición.
- Si no, mantiene la misma posición.

Para el envío de posición se utiliza la función de Matlab fwrite(), la cual escribe los datos en el objeto tcpip, de la siguiente manera.

```
fwrite(conexión,tt,'double');
```

Siendo conexión: el objeto tcpip al que se escriben los datos,

tt: el vector de posición ,

double: el tipo de dato con el que se envía el valor tt.

Recibo de datos

La figura 8 muestra el programa que realiza el recibo de datos de posición. El bloque “Recibo de posición”, con la función y “recibidos02”, recibe datos de posición, y estos se escriben al dispositivo háptico a través del controlador y el bloque haptik_simulink.

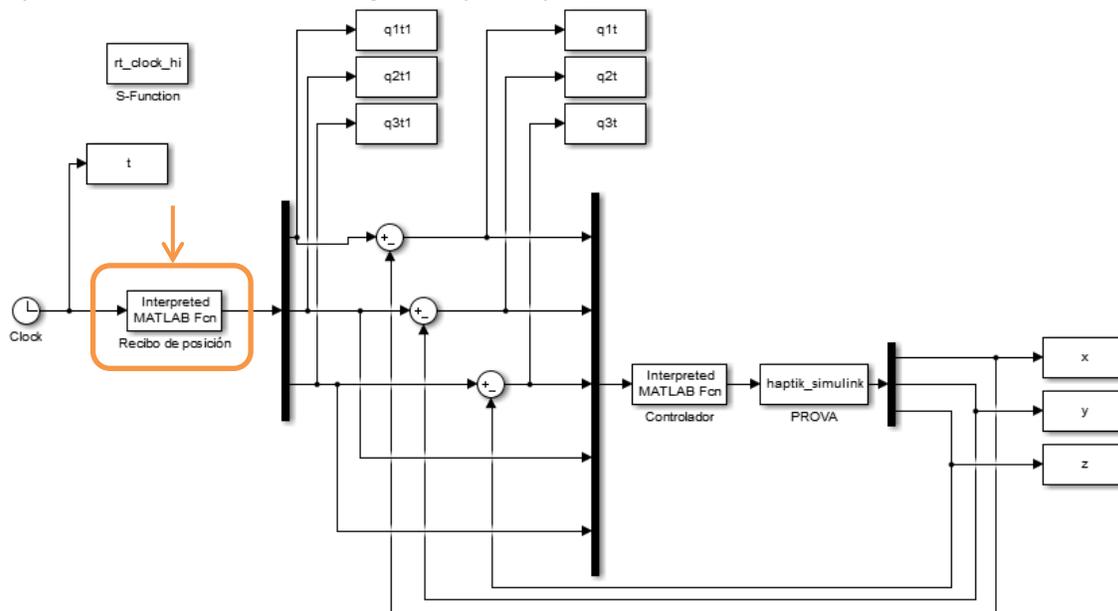


Figura 8. Recibo de datos

Función recibidos02.

La función recibidos02 es ejecutada por el bloque “Recibo de posición”. Esta recibe las posiciones con la función fread(), de la siguiente manera.

```
Info = fread(conexión02, [3 1], 'double')
```



Siendo conexión02: el objeto tcpip desde donde se leen los datos,

[3 1]: tamaño del vector de datos que recibe,

double: el tipo de datos del vector que recibe.

Asignándose el valor de la función fread() a la variable info.

2.3. Control del sistema de teleoperación

De las ecuaciones de movimiento del omni phantom, el modelo dinámico del robot contiene no linealidades que se deben principalmente a las fuerzas de fricción, coriolis, gravedad y fuerzas centrífugas, por lo que no es posible aplicar directamente las técnicas de control clásico, por lo tanto se aplica un control PD con compensador de gravedad, que contrarresten las no linealidades que aparecen en el modelo dinámico, en este caso el vector de gravedad, se aplica este controlador ya que es uno de los más sencillos y además garantiza el control de los movimientos del robot para que siga una trayectoria determinada por el omni maestro.

Para mover el omni Phantom esclavo a la posición deseada q_{1t1} , q_{2t1} y q_{3t1} , enviados por el omni maestro, se utiliza un controlador PID con compensador de gravedad. En la figura 9 muestra el programa "Recibo" con el bloque Controlador.

En el esquema se observa que la posición recibida por el omni maestro (q_{1t1} , q_{2t1} , q_{3t1}) es el set point del controlador; se hace una diferencia la posición actual (q_1 , q_2 , q_3), que es leída por el bloque haptik_simulink, para obtener el error de posición, este entra al controlador el cual corrige la posición hasta disminuir el error a cero.

3. Resultados experimentales

3.1. Descripción del equipo experimental.

El equipo experimental consiste en un manipulador Omni Phantom (dispositivo háptico) en arquitectura abierta, es decir puede implementarse cualquier algoritmo de control a este dispositivo háptico. También dos computadora con Windows 7 instalado; con software especializado como visual studio 2008 C++, Matlab R2014a, tal como se muestra en la figura 10.

3.2. Resultados experimentales

Los resultados experimentos de la teleoperación, realizando trayectorias de forma manual y aleatoria con el Omni maestro, cada uno con diferente duración (en un tiempo de 15 a 35 segundos), las cuales fueron enviadas a través de internet siendo recibidas y repetidas por el Omni esclavo. De esta forma se obtuvieron las gráficas de error de posición y de la posición deseada (enviada por el Omni maestro) contra la posición real realizada por el esclavo.

La figura 11 muestra las gráficas del primer, segundo y tercera articulación respectivamente (de arriba hacia abajo) del primer experimento. Se muestra en color azul el set point, que es la trayectoria en grados enviada por el Omni maestro y en color rojo la trayectoria realizada en grados por el Omni esclavo (para cada articulación). Como se puede observar, se obtuvieron buenos resultados ya que hay una diferencia muy pequeña entre las trayectorias deseadas y las reales.

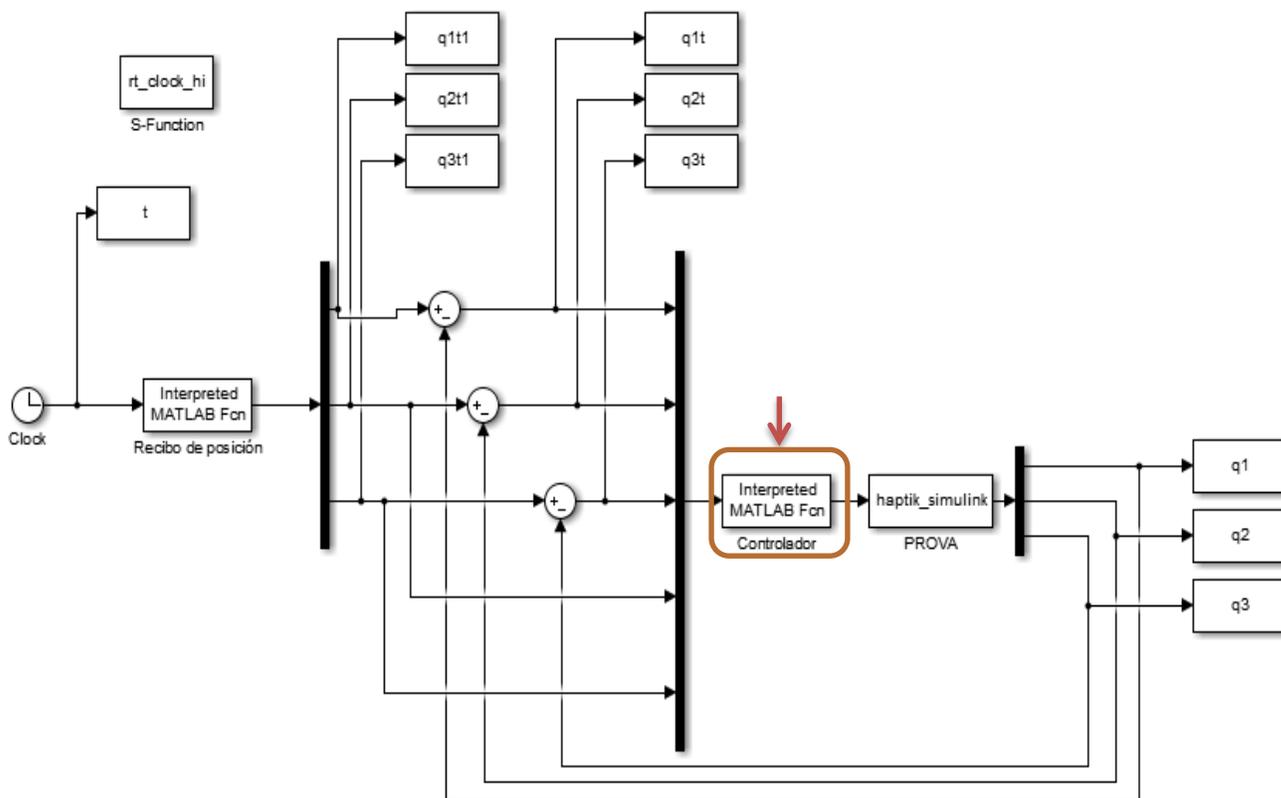


Figura 9. Control PD+G

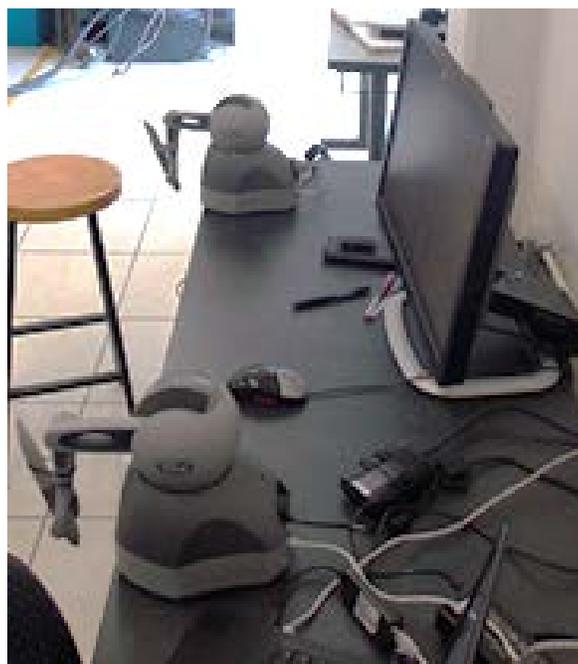


Figura 10. Equipo experimental

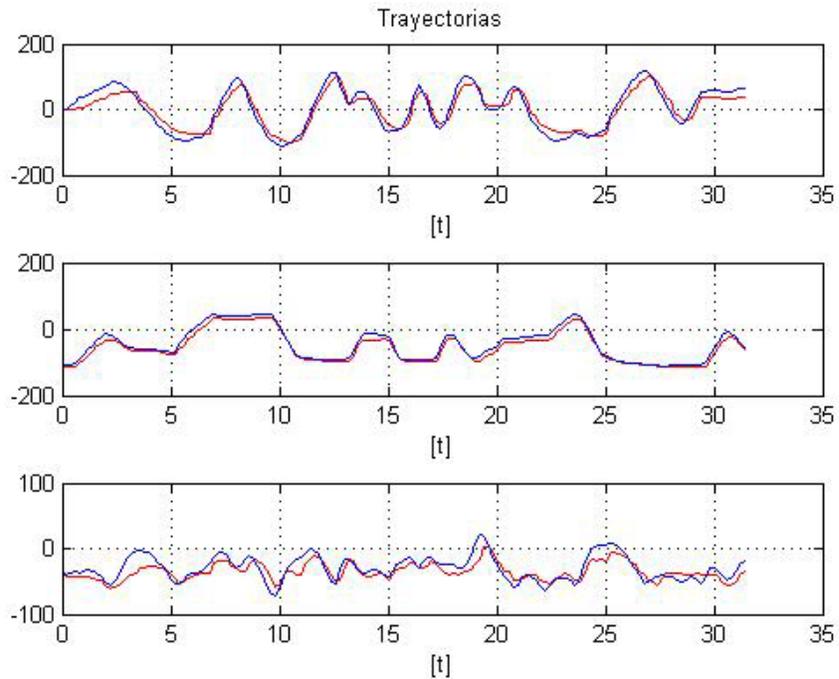


Figura 11. Trayectoria deseada vs real del primer experimento

El segundo experimento consiste en realizar movimientos más suaves tal como se muestra en la figura 12, la gráfica superior corresponde a la primera articulación, la gráfica de en medio corresponde a la segunda articulación y la gráfica inferior corresponde a la tercera articulación. Como se observa se tiene un mejor desempeño en trayectorias suaves, su error es más pequeños, en color azul es la trayectoria en grados enviada por el Omni maestro y en color rojo la trayectoria realizada en grados por el Omni esclavo (para cada articulación).

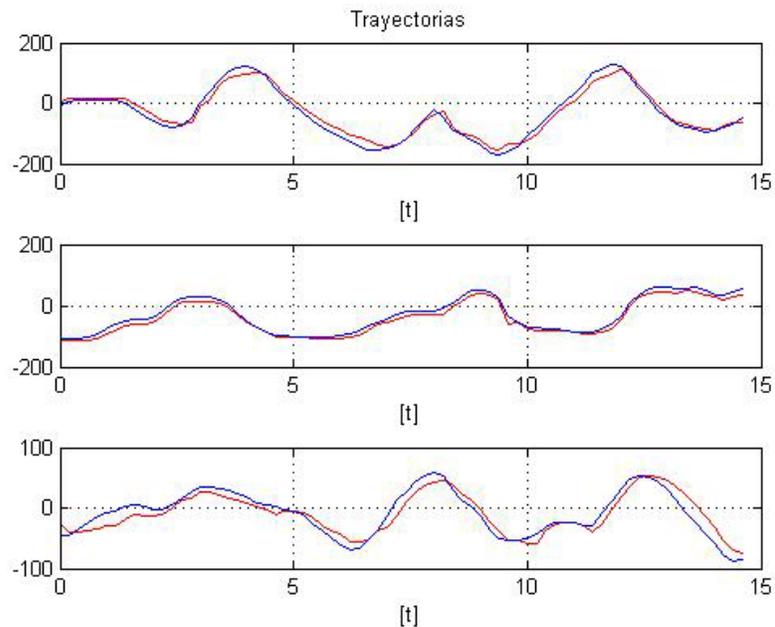


Figura 12. Trayectoria deseada vs real del primer experimento



3. Conclusiones

En el presente trabajo de investigación se logró construir un sistema de teleoperación con dos dispositivos hápticos Omni Phantom utilizando las herramientas de Matlab, Simulink y la librería Haptik.

La comunicación se consiguió bajo el protocolo TCP/IP con ayuda de los objetos TCPIP de Matlab y con las funciones `fwrite()` y `fread()`, que permiten la escritura y lectura de datos (posiciones o trayectorias) vía internet de manera eficiente.

Para seguir la trayectoria y minimizar los problemas que causan los retardos en la comunicación se implementa un controlador PD con compensador de gravedad teniendo un resultado satisfactorio en el seguimiento de trayectorias por parte del Omni esclavo. Las figuras 11 y 12 muestran una comparación de la trayectoria deseada en ángulos (color azul) enviada por el manipulador maestro contra la real (color rojo), es la que realiza en manipulador esclavo. Los resultados son buenos, el error angular es pequeño, sin embargo se tiene un retardo de tiempo, esto se puede minimizar implementando un controlador no lineales, donde involucre el modelo del omni.

Este trabajo de investigación queda como base para futuros trabajos de teleoperación en los que se aplique controladores no lineales más complejos que incluyan parte del modelo matemático de los dispositivos hápticos, complementándolo por ejemplo con entornos virtuales o llevándolo a una aplicación en específico como lo es el diagnóstico de deficiencias motrices, entrenamiento de cirujías a distancia, etc.

Referencias

- [1] Fong, T., and Thorpe, C. "Vehicle Teleoperation interfaces". Autonomous Robots. 2011
- [2] Vertut, J., and Coiffet, P. "*Les Robots; Téléopération, évolution des technologies*". París: Editions Hermes. 1985.
- [3] Sheridan, T. "*Space Teleoperation through Time Delay*". Transactions on Robotics and Automation. 1993.
- [4] Dario, P., & Menciassi, A. "*Robotics for Surgery*". Annual Conference and the Annual Fall Meeting of the Biomedical Engineering Society EMBS/BMES Conference. 2002.
- [5] Fung, W. K., Xi, N., Lo, W. T., & Liu, Y. H. "*Adaptive real-time Internet-based teleoperation systems for efficiency improvement using network QoS*". IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. 2003.
- [6] Alvarado Juárez, D. A., Butrón Castañeda, M. A., Diaz Loyo, D., & González García, L.. "*Diseño de Brazo Manipulador Háptico Teleoperado. La Mecatrónica en México*", 2 (2), 67-76. 2013.



Robot paralelo de 3 GDL aplicado al diagnóstico y rehabilitación de lesiones de tobillo

Vázquez García Carlos Ernesto, Gudiño Lau Jorge, Charre Ibarra Saida Miriam,
Castañeda Chávez Ricardo Salvador

Universidad de Colima
Facultad de Ingeniería Electromecánica
Manzanillo, Colima, C.P. 28860
E-mail: jglau@ucol.mx

Resumen

El presente trabajo muestra el diseño, análisis y construcción de un robot paralelo de 3 grados de libertad aplicado al diagnóstico y rehabilitación de pacientes lesiones de extremidad inferior, específicamente de tobillo. También se hace una descripción a detalle de la parte mecánica y eléctrica para la construcción del robot paralelo, donde explica del diseño del prototipo (dimensiones y espacio de trabajo), así como un análisis mecánico del robot paralelo, además se presenta el análisis eléctrico para la protección, etapa de potencia y control del robot. Por último, para verificar que el diseño, la construcción y el control funcionan correctamente, se muestran los resultados experimentales, empleando un control lineal PD.

Palabras clave: Robot, articulaciones, mecanismos, actuadores, sensores, rehabilitación y diagnóstico.

1. Introducción

La robótica aplicada a la rehabilitación y diagnóstico ha sido bien vista por los terapeutas y médicos en el área de rehabilitación, ya que es un excelente complemento para la terapia en pacientes que sufren un accidente o deficiencias motoras.

Se han realizado trabajos para la rehabilitación de tobillo en algunas Universidades, como la Universidad de New Jersey, EUA, que desarrollaron una plataforma con sensor de fuerza como se observa en la figura 1a y en la Universidad Tsukuba de Tecnología, Japón, desarrollaron un prototipo similar para rehabilitación del tobillo, como se observa en la figura 1b.[1]

Existen también productos comerciales como el Kinetec 5190 Ankle CPM Machine, este equipo de rehabilitación es más completo, este genera movimientos circulares teniendo como eje el tobillo, es automático y manipulado por un control manual (teach-pendant), por lo que el usuario controla el tiempo y la velocidad, tal como se observa en la figura 2.[2]

Las lesiones ligamentarias del tobillo son las más frecuentes que se presentan en las actividades cotidianas y del deporte; se conocen con los términos de esguince (ET), torcedura o entorsis de tobillo. Estas lesiones representan uno de los principales motivos de consulta en los servicios de urgencia [3].

Anualmente, en el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) alrededor de 275,639 personas con ET son tratadas en los servicios de medicina familiar; como parte de su tratamiento requieren



varios días de incapacidad para la recuperación de la extremidad lesionada, dependiendo el grado de lesión [3].

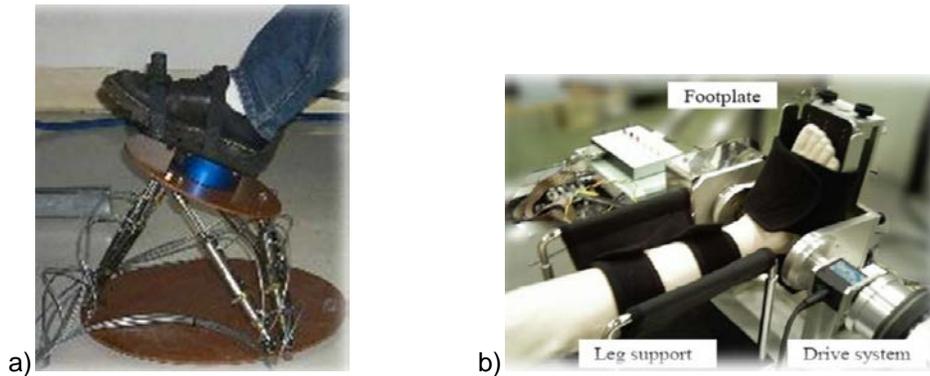


Figura 1. Aparatos de rehabilitación realizadas por Universidades



Figura 2. Aparatos de rehabilitación realizadas por fabricantes

Existen 4 niveles de recuperación dependiendo del nivel de actividad que el paciente requiera: pasiva, asistida, activa y resistiva [4].

- **Pasiva:** Aquella donde el paciente no interviene en lo absoluto en la ejecución del movimiento, por lo general el terapeuta realiza todo el esfuerzo.
- **Activa:** Es cuando la persona realiza todo el esfuerzo por sí misma.
- **Asistida:** Es una modalidad intermedia donde se combina el esfuerzo del paciente y del terapeuta.
- **Resistiva:** Aquella en la que se utilizan sistemas mecánicos donde se presenta una fuerza opuesta al movimiento del paciente.

El tobillo posee tres grados de libertad, cada uno con dos movimientos recíprocos: dorsiflexión/plantarflexión, eversion/inversion and abduction/adduction [5].

- **Dorsiflexión/plantarflexión** (figura 3a): La dorsiflexión es el movimiento de la parte superior del tobillo y del pie hacia la parte anterior de la tibia, mientras que la plantarflexión es el movimiento donde el tobillo y el pie se separan de la tibia.

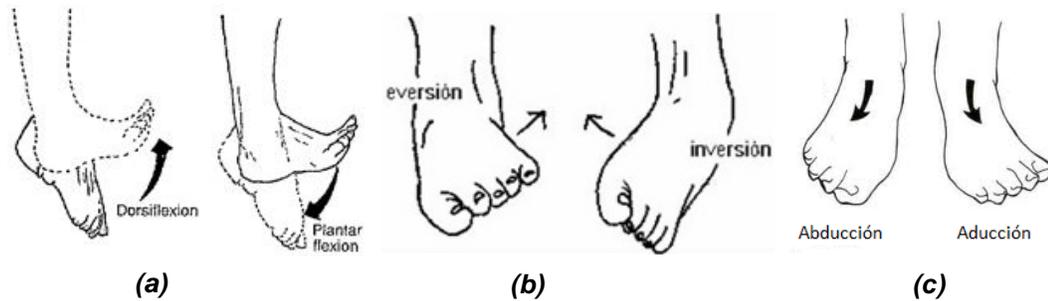


Figura 3. Movimientos del tobillo

- **Eversión/inversión** (figura 3b): La eversión es el giro del tobillo y del pie hacia afuera, separándose de la línea media, mientras que en la inversión giran hacia adentro, acercándose a la línea media. El peso recae sobre el borde medial del pie.
- **Abducción y aducción** (figura 3c): La abducción es el giro del tobillo hacia afuera de la línea media (sin girar el pie), mientras que la aducción es el giro hacia adentro de la línea media (sin girar el pie).

En general, existen 4 tipos de lesiones, catalogados por grados, como se observa en la tabla 1. Los pacientes con los tres primeros grados pueden pasar por la rehabilitación con el robot paralelo, siempre y cuando la lesión no se haya convertido en secuela (pérdida total de la movilidad o que ocupe prótesis) o bien cuando el paciente deje de sentir dolor y sólo requiera recuperar el sentido de la movilidad.

Tabla 1. Grafos de lesiones de tobillo

Grado	Manifestaciones clínicas
Grado I	Lesión parcial de un ligamento sin pérdida funcional o con limitación leve (ejemplo: el paciente es capaz de caminar con apoyo total y dolor mínimo) [3].
Grado II	Con discapacidad funcional moderada, limitación parcial de la función y el movimiento (el paciente tiene dolor cuando apoya o camina) [3].
Grado III	Pérdida de la función y el movimiento (el paciente es incapaz de caminar o apoyarse). Los ligamentos están completamente desgarrados y no son funcionales. Lesión total (ruptura) [3].
Grado IV	En el servicio de traumatología se decide si es necesario el manejo quirúrgico [3].

Por lo anterior, el presente trabajo está realizado para apoyar y asistir al diagnóstico y rehabilitación (activa y pasiva) de lesiones de pacientes de extremidades inferiores (tobillo). Se concentra principalmente en la población infantil (6 a 11 años), debido al par mecánico de los motores que se utilizan.

2. Desarrollo

2.1 Diseño del prototipo

El robot paralelo fue diseñado en SolidWorks®. En la figura 4 se puede apreciar una vista isométrica del mismo, donde se observa la plataforma de alucobond en la que el pie del paciente se

coloca. Así mismo, en las figuras 5, 6 y 7 se observa el diseño de los 3 tipos de articulaciones responsables del movimiento angular del robot: rotacional (figura 5), de tornillo (figura 6) y esférica (figura 7).

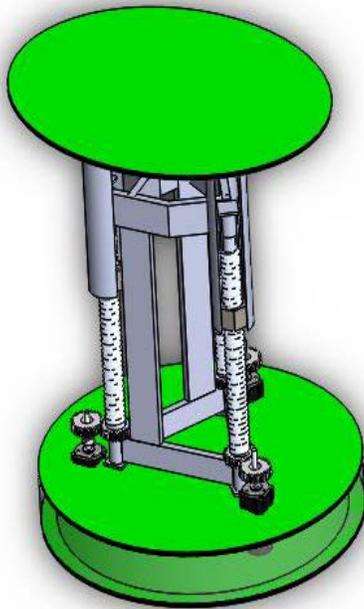


Figura 4. Vista isométrica del prototipo diseñado en SolidWorks®

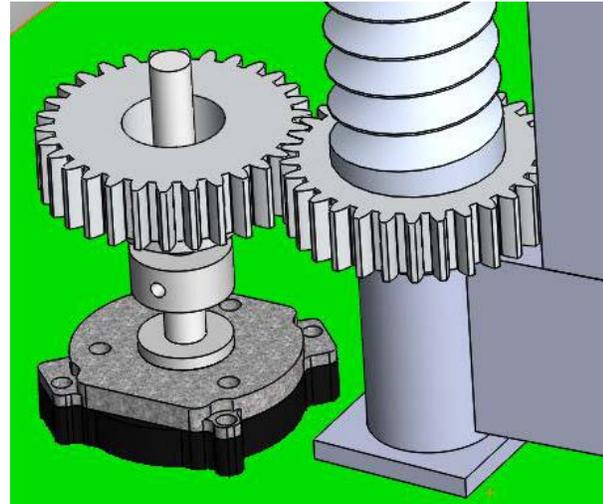


Figura 5. Diseño de la articulación rotacional mediante engranaje.

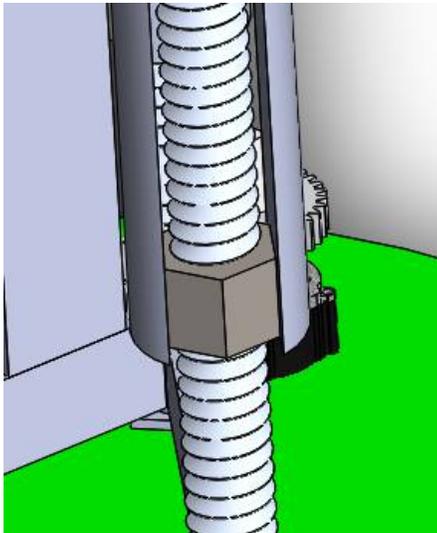


Figura 6. Diseño de la articulación de tornillo mediante varilla ACME.



Figura 7. Diseño de la articulación esférica mediante juntas.

El robot paralelo puede trabajar en un espacio plano de 0.14 m^2 , lo que es igual a un círculo de 43.5 cm de diámetro. Se diseña para que el espacio bidimensional ocupado sea del mismo tamaño que la plataforma donde el paciente asentará su pie.



En un espacio de 3 dimensiones, el robot puede modificar su altura, adaptándose al usuario, como se puede observar en las figuras 8 y 9. Puede expandirse 25 cm, de tal forma que su altura final puede estar dentro de un rango de 60 cm a 85 cm.

La plataforma del robot esta manufacturada con un tabloide de Alucobond®, se utiliza una fresadora universal para los acabado, Los mecanismos del robot están formados por varilla roscada tipo ACME y el chasis del robot está construido a partir de soleras de metal de 1.5" de ancho, las cuales forman 3 patas separadas 120° entre sí, donde se sostienen las varillas roscadas, como se puede observar en la figura 9.



Figura 8. Dimensiones mínimas del robot.



Figura 9. Dimensiones máximas del robot.

2.3 Articulaciones

Se observan 3 clases de articulaciones en el robot: esférica, tornillo y rotacional.

- **Esférica** (figura 10): Son aquellas juntas que, al tener 3 GDL, facilitarán el movimiento angular de la plataforma. Cada una posee un movimiento angular máximo de 30° tanto en sentido horario como en sentido anti-horario y, debido a que la plantar-flexión del tobillo es el movimiento que ofrece mayor libertad angular (30°), las juntas esféricas aplicadas al robot son ideales para simular todos los tipos de movimiento de tobillo.



Figura 10. Juntas esféricas del robot



- **Tornillo** (figura 11): Este tipo de articulación funcionará para elevar y descender las juntas esféricas, con el fin de realizar distintos tipos de movimientos angulares y así poder imitar los movimientos de un tobillo.

Debido a que el tornillo posee un paso de 6 tpi (hilos por pulgada) y la velocidad angular máxima del motor es de 127 rpm, se obtiene que la velocidad lineal (V) a la cual el mecanismo funcionará es de $\frac{1}{3} \frac{\text{in}}{\text{s}}$ aproximadamente, como se comprueba en (1).

$$V = \frac{\left(\frac{127 \text{ rpm}}{60}\right)}{6 \text{ tpi}} = 0.35 \frac{\text{in}}{\text{s}} \approx \frac{1}{3} \frac{\text{in}}{\text{s}} \quad (1)$$



Figura 11. Articulación de tornillo.

- **Rotacional** (figura 12): Este tipo de articulación es utilizado únicamente para transmisión de fuerza entre el motor y la varilla ACME. Para ello, se utilizó un tren de dos engranes con relación 1:1, por lo cual no se vio necesario el cálculo para el tren de engranajes, sin embargo, se toma en cuenta el diámetro de los mismos con el fin de reducir el consumo de material.



Figura 12. Articulación rotacional.



Para mover la plataforma, se utilizan varillas ACME que al movimiento de rotación transmitido desde los motores DC al engrane. Dichos engranes son maquinados en un torno convencional. Así mismo, con el fin de que la fricción no afecte al esfuerzo del motor, se colocan rodamientos en las puntas de cada varilla ACME, unidos al chasis mediante bases para los rodamientos.

En la base de los rodamientos superiores existe un barreno dentro del cual se inserta una varilla para unir al chasis del robot. Las juntas esféricas son acopladas a la tuerca que corre dentro de la varilla ACME. La unión se hace mediante tubos de acero de 2" (mismo diámetro que las bases para rodamientos). La tuerca es soldada al tubo de acero y la junta esférica es acoplada mediante una rosca estándar.

Por último, se acopla cada una de las juntas esféricas a la plataforma circular mediante acoples de aluminio, que son maquinados en un torno. Dichos acoples tienen la forma de la cabeza de la junta esférica, por lo que no existe posibilidad de que se desacople de la plataforma circular.

2.4 Actuadores

Se utilizaron 3 motores DC Faulhaber 234I012cr (figura 13). La f.e.m. nominal del inducido es de 12 V. Presenta un tren de engranajes con relación 64:1, por lo que su velocidad se reduce de 8100 rpm a 127 rpm. La intensidad que consume sin carga presente es de apenas 70 mA, mientras que con carga máxima llega a los 1.42 A. Se realizaron los cálculos correspondientes con los datos anteriores y mediante (2) se obtuvo el par del motor (T_{max}).

$$T_{max} = \frac{(12 V) * (1.42 A)}{2\pi \frac{127 rpm}{60}} = \frac{17 W}{4\pi \frac{rad}{s}} = 1.35 N * m \quad (2)$$

En las especificaciones del motor se establece un par de 1.72 N*m, sin embargo, debido al desgaste provocado por el uso del motor, éste va perdiendo su par, por lo que el resultado obtenido en (2) es válido.

En la implementación física, se utiliza una fuente de 12 V para alimentar el sistema de los motores. Dicha fuente va conectada primeramente al módulo de puente tipo H doble L298n, utilizado para el control de giro de los tres motores a utilizar; dicho módulo genera una caída de 1.4 V, por lo tanto, el voltaje neto en las entradas del motor es de 10.6 V, haciendo que el torque disminuya. Aplicando (2) con el cambio de 12 V a 10.6 V, obtenemos un par por cada motor de $T_{max} = 1.13 N*m$.



Figura 13. Motor DC Faulhaber 234I012cr.



2.5 Sensores

- Encoders:** Los encoders de los motores DC Faulhaber 2342I012cr son de tipo óptico y poseen 12 aspas que, multiplicado por la relación de engranaje (64:1), da un total de 768 pulsos por revolución. Posee 6 pines, cuyo orden se puede observar en la figura 14. Como cualquier encoder óptico, se necesitan tener 2 canales para identificar el sentido de giro del motor; en la figura se denotan con el pin 4 y 5 (canal A y canal B, respectivamente).

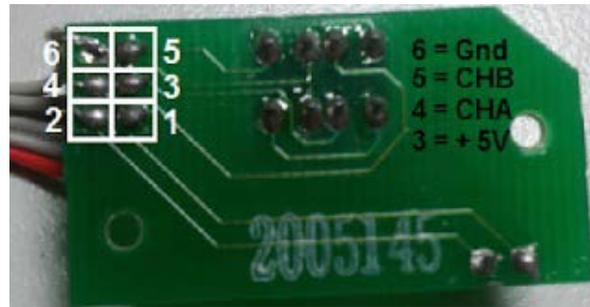


Figura 14. Pines del encoder óptico del motor DC Faulhaber 2342I012cr.

Tanto el sentido de giro como el número de pulsos se comprueba mediante un osciloscopio, como se puede observar en la figura 15. Se observa que el canal B se encuentra 90° adelantado con respecto al canal A, lo que significa que el motor se encuentra girando en sentido anti-horario (de haberse encontrado 90° atrasado, significaría que el motor se encontraría girando en sentido horario). Así mismo, se utiliza (3) para verificar el número de pulsos por revolución (ω) del encoder. Se toma como referencia los 1.623 kHz que señala el osciloscopio.

$$\omega = \frac{(60 \text{ s}) * (1.623 \text{ kHz})}{127 \text{ rpm}} = 766.78 \text{ ppr} \approx 768 \text{ ppr} \quad (3)$$

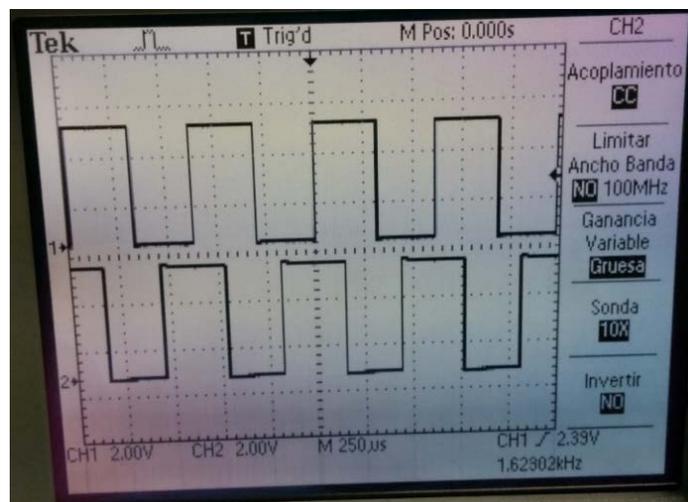


Figura 15. Lectura en osciloscopio del encoder

- Sensor de fuerza resistivo:** El sensor FSR-B presenta una disminución de la resistencia cuando aumenta la fuerza aplicada a la superficie activa. La característica de fuerza - resistencia del sensor



se puede observar en la figura 16 y se analiza que el sensor posee un rango resistivo de 100Ω hasta los $100 \text{ k}\Omega$ contra un rango de fuerza de 10 gf hasta 10 kgf . La variación de resistencia respecto a la fuerza no es lineal y se observa un umbral o “zona de ruptura” en fuerzas menores a 20 g , dando como resultado una resistencia de más de $100 \text{ k}\Omega$. Así mismo, la zona de saturación se presenta a los 10 kg (la presión típica para este punto es de 100 a 200 psi), si es sobrepasado el sensor transmitirá una lectura errónea.

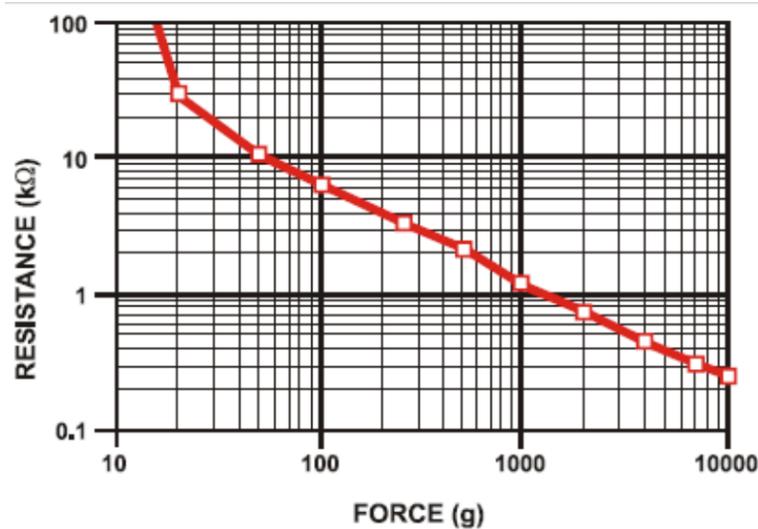


Figura 16. Diagrama Fuerza – resistencia del sensor de fuerza resistivo

Gracias a este sensor se puede medir la fuerza aplicada por el paciente y así tener una retroalimentación de la misma. Sin embargo, resulta complicado conocer la función de la gráfica resistencia-fuerza debido a la no linealidad, por lo que se opta por tabulación de mediciones graduales en lugar de obtener la función de la gráfica.

- **Sensor final de carrera:** Como se sabe, el final de carrera es un elemento de mando que se acciona de manera automática por la acción de un objeto móvil que se desplaza. En conclusión, es un sensor on/off de objetos móviles y se utilizará en el proyecto con el fin de calibrar el robot, es decir, gracias al sensor final de carrera el robot podrá regresar a su posición inicial, sin depender del contador y así tendrá un sistema anti-fallos con respecto a una incertidumbre en la medida de los encoders.

La incertidumbre en la medida puede ser causada debido a un problema mecánico durante la elevación de la estructura; también, debido a un fallo en la energía eléctrica mientras el robot está realizando sus rutinas.

3. Resultados

3.1 Características físicas

La estructura del robot se puede observar en la figura 17. Cada uno de los motores se encuentra posicionados 120° entre sí, los cuales provocan el movimiento angular de la plataforma



de alucobond donde el paciente asentará su pie. Los sensores límite de carrera se posicionaron a lado de cada junta rotacional.

Encima de la plataforma de alucobond se muestra el sujetador de pie debajo del cual se encuentran los dos sensores de fuerza resistivos. Por último, la parte inferior del robot posee la caja de conexiones en donde se encuentran los circuitos de sensores, actuadores y el microcontrolador.



Figura 17. Estructura del robot paralelo.

Los sensores finales de carrera se posicionan a lado de la transmisión de engranaje (como se observa en la figura 18) de tal forma que cuando los cilindros lleguen a la posición más baja, los switches se cierran y envíen una señal al robot.



Figura 18. Posicionamiento en final de carrera

Los dos sensores de fuerza resistivos fueron posicionados en la plataforma del robot paralelo de tal forma que la presión realizada por el talón y la punta del pie se transmitieran a ellos con la menor pérdida posible debido a la distribución de fuerzas. Para ello, se colocan dos objetos circulares de diámetro igual al de los sensores de fuerza. Estas posiciones se pueden observar en la figura 19.

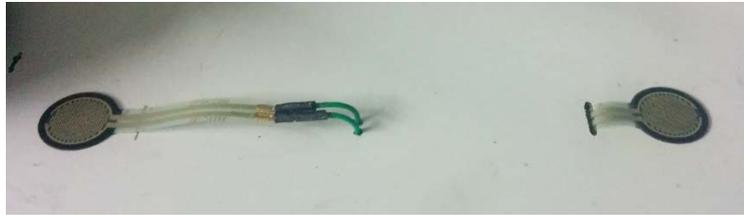


Figura 19. Posicionamiento de los sensores de fuerza resistivos

3.2 Pruebas del robot paralelo

En la rehabilitación pasiva se realizaron rutinas que el Instituto Mexicano del Seguro Social recomienda a los pacientes y se programaron para que el robot paralelo simulara dichas acciones. Entre ellas, se puede observar la dorsiflexión en la figura 20, la plantarflexión en la figura 21, la inversión en la figura 22 y la eversión en la figura 23. Se optó por iniciar con un ángulo máximo de 15°, aunque ello dependerá del grado de flexión del paciente.

Sosténgase del respaldo de una silla con las dos manos, y con los pies juntos párese de puntas.
Repetir 20 veces.



Figura 20. Rutina de dorsiflexión

Sosténgase del respaldo de una silla con las dos manos, y con los pies juntos párese sobre sus talones.
Repetir 20 veces.



Figura 21. Rutina de plantarflexión

Apoye por completo los pies en el suelo. Levante sus pies de tal forma que sólo quede apoyado sobre el piso el borde interno de los pies.
Repetir 20 veces.



Figura 22. Rutina de inversión

Apoye por completo los pies en el suelo. Levante sus pies de tal forma que sólo qued apoyado sobre el piso el borde externo de lo pies.
Repetir 20 veces.

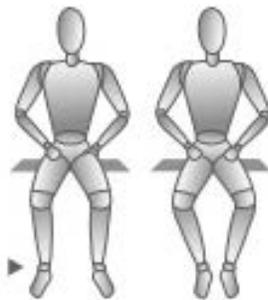


Figura 23. Rutina de eversión.

4. Conclusiones

El robot paralelo de 3 GDL permite dar un análisis de la situación real del paciente (mediante la tabulación y grafica del movimiento del paciente comparado con un movimiento ideal, así como el error obtenido), además de asistir en la rehabilitación activa del mismo, así mismo puede realizar las rutinas necesarias para apoyar en la rehabilitación pasiva del paciente.

Una de las observaciones que un fisioterapeuta hizo en el diagnóstico de lesiones de tobillo es que se necesita la medición del ángulo de flexión del paciente y no necesariamente la fuerza que se aplique. Sin embargo, el equipo optó por dejar los sensores de fuerza resistivos para controlar el movimiento de la plataforma con respecto a las órdenes del paciente, lo que permite conocer de manera secundaria el ángulo de flexión máximo del mismo.



Referencias

- [1] Godoy, Jhonathan Isidro, Tesis "Robot paralelo para la rehabilitación de tobillo", Maestría en Ciencias, Cenidet, 2012.
- [2] García, Gil, "Rehabilitador para tobillo por movimiento pasivo (automatizado)", Maestría en Ciencias, Instituto Politécnico Nacional, Mexico D.F., 2008
- [3] Secretaría de Salud, Guía de Práctica Clínica: Diagnóstico y Manejo del Esguince de Tobillo en la Fase Aguda para el Primer Nivel de Atención, Ciudad de México: CENETEC, 2013.
- [4] C. Guzmán y J. Carrera, «Diseño y control de un sistema interactivo para la rehabilitación de tobillo: TobiBot,» SciELO México, 2014.
- [5] C. Thompson, Manual de kinesiología estructural, Barcelona: Paidotribo, 2000.



Brazo Robótico de 3 Grados de Libertad con Inteligencia Artificial

Bueno Ledezma Gabriel, Conejo Benitez Cesar Eduardo, Juan Barbosa Gerardo,
Pérez Bailón Waldemar, Ramírez Rebollo Daniel Rodrigo

Instituto Tecnológico de Lázaro Cárdenas

Resumen

Este artículo describe el funcionamiento de un brazo robótico de 3 grados de libertad llamado "ROBO-WRITER" al cuál se le aplica inteligencia artificial; describe las características mecánicas que se utilizaron para la implementación, así como el tipo de programación que se utilizó. También está presente la teoría de las redes neuronales, sin descartar que se explicara cada una de las funciones que se utilizaron, incluyendo el programa que contiene la red neuronal y la entrenadora. La finalidad de este prototipo es detectar dígitos del 0 al 9, los números son dibujados en una interfaz del mismo programa, el número que es dibujado será reconocido mediante la red neuronal y se desplegará una imagen del número que se dibujó, al mismo tiempo mandará una instrucción al brazo robótico para que plasme el número detectado. La problemática a resolver será que, mediante la implementación de los cálculos de la cinemática directa e inversa combinado con redes neuronales, se demostrará que el brazo robótico puede moverse a una cierta posición para posteriormente escribir el número deseado por el operador de la PC, además de que, al ser un proyecto educativo, podría implementarse en la industria para un uso especial.

1. Introducción

Actualmente la mayoría de las investigaciones hacia el estudio de la robótica se ha ido desarrollando de forma avanzada en países de primer nivel, principalmente en Japón, pero desafortunadamente en México no se ha desarrollado a grandes aspectos. Existen empresas e industrias comerciales mexicanas que utilizan manipuladores robóticos para la manufactura de sus productos, pero el costo para la obtención de estos prototipos robóticos es elevado debido a que son exportados del extranjero, esto provoca que la mano de obra sea más cara en México y por consiguiente que los productos se vendan a un precio elevado.

Se propuso realizar un brazo robótico de tres grados de libertad con la implementación de la cinemática e inteligencia artificial mediante el uso de redes neuronales, para así tener la capacidad de identificar los números manuscritos del 0 al 9 que serán dibujados en una interfaz gráfica de MATLAB, los cuales son plasmados y hechos por el brazo robótico el cual se muestra en la figura 1.

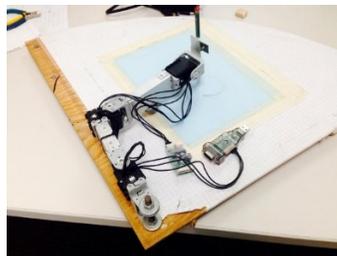


Figura 1. Brazo robótico planar de tres grados de libertad



La problemática a resolver será que, mediante la implementación de los cálculos de la cinemática directa e inversa combinado con redes neuronales, se demostrará que el brazo robótico puede moverse a una cierta posición para posteriormente escribir el número deseado por el operador de la PC, además de que, al ser un proyecto educativo, podría implementarse en la industria para un uso especial.

En la actualidad los métodos de la inteligencia artificial (IA) tienen un gran auge y muchos investigadores se encuentran estudiando nuevas alternativas en el área. Hoy en día es común el empleo de sistemas que utilizan la IA para su funcionamiento cotidiano, entre ellos los equipos electrodomésticos como lavadoras, hornos de microondas, cámaras de video, e inclusive sistemas de transporte. Lo que se pretende con estos métodos en ingeniería es resolver los problemas, no sólo de una manera novedosa, sino sobre todo tener mejores soluciones, más eficientes y mejor planeadas [1].

2. Robótica, desarrollo de Interfaces e Integración de tecnologías

La inteligencia artificial es una de las ciencias donde su inicio fue del computador fisiología y filosofía, además une varios campos como la robótica y sistemas expertos, en donde todos estos tienen un objetivo común que es la creación de máquinas que puedan pensar e imitar a un ser humano. Para que un robot piense e imite tareas igual e incluso mejor que si el mismo humano las realizara se requieren de algoritmos bastantes complejos y completos. Un algoritmo es un conjunto prescrito de instrucciones o reglas bien definidas, ordenadas y finitas que permite realizar una actividad mediante pasos sucesivos; en cuanto más compleja sea la tarea mayor complejidad tendrá el algoritmo.

La robótica es una ciencia o rama de la tecnología, que estudia el diseño y construcción de máquinas capaces de desempeñar tareas realizadas por el ser humano o que requieren del uso de inteligencia.

La Inteligencia Artificial se ve aplicada al manejo de diferentes maquinas haciéndolas cada vez mejores al momento de recibir y controlar información exterior mediante su programación y sensores especializados, en donde nacen los conocidos robots. Los robots son diseñados con la finalidad de reducir el esfuerzo del hombre por ello que los robots tienen su respectiva clasificación:

- a) Robots Play-back, los cuales regeneran una secuencia de instrucciones grabadas, como un robot utilizado en recubrimiento por spray o soldadura por arco. Estos robots comúnmente tienen un control de lazo abierto.
- b) Robots controlados por sensores, estos tienen un control en lazo cerrado de movimientos manipulados, y hacen decisiones basados en datos obtenidos por sensores.
- c) Los robots médicos son, fundamentalmente, prótesis que se adaptan al cuerpo y están dotados de potentes sistemas de mando. Con ellos se logra igualar al cuerpo con precisión los movimientos y funciones de los órganos o extremidades como son los brazos y piernas.
- d) Los androides o también conocidos como humanoides son robots que se parecen y actúan como seres humanos, en la actualidad existen diversos humanoides y cada uno cuenta con funciones diferentes, existen humanoides que se emplean en el área de la medicina y otros como un juguete el cual el usuario pueda interactuar y aprender.

2.1 Cinemática y Análisis Matemáticos para un Brazo Robótico

En la ingeniería, para el diseño de un brazo robótico y este funcione de forma automática, es necesario realizar cálculos matemáticos los cuales toman en cuenta el número de grados de libertad, las dimensiones de sus eslabones y la posición del manipulador. Estos cálculos matemáticos ayudan



a determinar la cinemática de los manipuladores robóticos y con el uso de la cinemática se puede obtener el valor de los ángulos para diferente posición. La cinemática se deriva en cinemática directa y cinemática inversa.

La cinemática de un robot es el estudio de los movimientos de un robot en el tiempo en donde se refieren a todas las propiedades geométricas. En un análisis cinemático, la posición, velocidad y aceleración de cada uno de los elementos del robot son calculadas, sin considerar las fuerzas que causan el movimiento. En esta sección se muestran los cálculos de la cinemática directa e inversa para nuestro manipulador robótico, los cuales fueron utilizados para implementarlos en su programación en MATLAB y así pueda realizar la función adecuada.

2.1.1 Cinemática Directa

La cinemática directa se refiere al uso de ecuaciones cinemáticas para calcular la posición de un actuador final a partir de valores específicos denominado parámetros. Para calcular la posición de una pieza rígida en una estructura, se debe de calcular las posiciones de todas las piezas de las que depende. Las ecuaciones cinemáticas de un robot son usadas en robots, juegos de computadoras y la animación.

En una cadena serial, la solución siempre es única, dado un conjunto de vectores estos siempre corresponderán a una única posición del actuador. Los métodos para el análisis de la cinemática directa son:

- a) Transformación de matrices
- b) Geometría
- c) Transformación de Coordenadas

El problema cinemático directo consiste en determinar cuál es la posición y orientación del extremo final del robot, con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia, conocidos los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot, [2].

El ROBO-WRITER es un robot manipulador que usa tres servomotores, por lo tanto, cuenta con tres grados de libertad. El ultimo grado de libertad consiste en subir o bajar la herramienta de escritura (lápiz), es por eso que para la obtención de la cinemática directa de este manipulador va a tomarse en cuenta los dos primeros grados de libertad ya que son los encargados para el movimiento del brazo robótico en la escritura.

En el caso del ROBO-WRITER se utilizó el método algebraico el cual mediante la figura 2 se pueden obtener las siguientes ecuaciones:

$$a = L_1 \text{Cos } \theta_1 \quad (1)$$

$$b = L_1 \text{Sen } \theta_1 \quad (2)$$

$$a' = L_2 \text{Cos}(\theta_1 + \theta_2) \quad (3)$$

$$b' = L_2 \text{Sen}(\theta_1 + \theta_2) \quad (4)$$

Donde:

a = eje de referencia X del primer eslabón

b = eje de referencia Y del primer eslabón

a' = eje de referencia X del segundo eslabón

b' = eje de referencia Y del segundo eslabón

L_1 = Primer eslabón

L_2 = Segundo eslabón

Θ_1 = Ángulo del primer eslabón respecto a su eje X

Θ_2 = Ángulo del segundo eslabón respecto al ángulo Θ_1

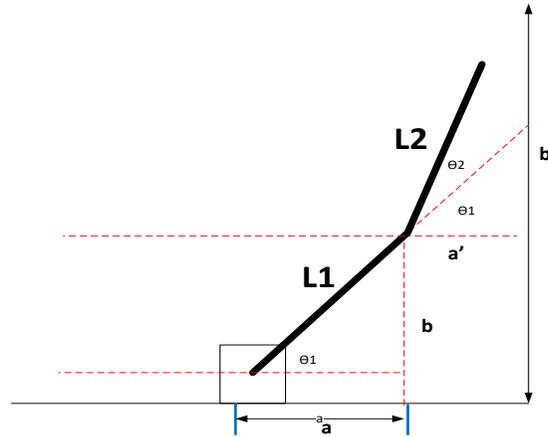


Figura 2. Robot planar de dos grados de libertad

La solución de la cinemática directa para la figura 1 es la suma de las ecuaciones (1) y (3) para determinar X y la suma de las ecuaciones (2) y (4) para determinar Y.

$$x = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (5)$$

$$y = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (6)$$

Existe otro método utilizado para la obtención de la cinemática directa del manipulador el cual está basado en la utilización de matrices de transformación homogénea.

Denavit y Hartenberg propusieron en 1955 un método sistemático para describir la geometría de los elementos de un robot, con respecto a un sistema de referencia fija [3] [4]. El método hace uso de una matriz de transformación homogénea para describir la relación espacial entre los eslabones adyacentes del robot.

El método de Denavit-Hartenberg describe la localización de cada eslabón en relación a sus vecinos, además, permite establecer un sistema de coordenadas ligado a cada uno de los eslabones del robot. Los sistemas de referencia de coordenadas de los eslabones se nombran de acuerdo al número del eslabón al que son asignados. Esto es, el sistema de coordenadas {i} se asigna al eslabón i [2].

En los sistemas de referencia de coordenadas se pueden encontrar cuatro parámetros llamados parámetros de Denavit-Hartenberg. Los cuatro parámetros dependen de la geometría de los eslabones y de las articulaciones que los unen los cuales son los siguientes:

a_i = Es la distancia de \hat{Z}_i a \hat{Z}_{i+1} medida a lo largo de \hat{X}_i .

α_i = Es el ángulo de separación entre \hat{Z}_i a \hat{Z}_{i+1} medido alrededor de \hat{X}_i .

d_i = Es la distancia de \hat{X}_{i-1} a \hat{X}_i medida a lo largo de \hat{Z}_i .

θ_i = Es el ángulo de separación entre \hat{X}_{i-1} y \hat{X}_i medido alrededor de \hat{Z}_i .

De estos cuatro parámetros, dos describen al propio eslabón y dos describen la conexión entre eslabones vecinos.

Se debe de asignar un sistema de referencia de coordenadas a la base del robot o eslabón cero, llamado sistema de referencia de coordenadas {0}, este sistema es fijo.



Normalmente la matriz de transformación homogénea de (4 x 4) que representa la posición y orientación relativa entre las coordenadas de los sistemas asociados a los eslabones consecutivos del robot se representa por [2]:

$${}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & w_{1 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rotación} & \text{Traslación} \\ \text{Perspectiva} & \text{Escala} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{i-1}_i R & P_{ORIG} {}^{i-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Donde $R_{3 \times 3} = {}^{i-1}_i R$ es una matriz de rotación (3 x 3) que determina la orientación del sistema de coordenadas (i) con respecto al sistema de coordenadas (i-1). $P_{3 \times 1} = P_{ORIG} {}^{i-1}$, es un vector de traslación de (3 x 1) que representa la posición del origen del sistema (i) con respecto al sistema (i-1), $f_{1 \times 3}$ una submatriz que representa una transformación de perspectiva y $w_{1 \times 1}$ una submatriz que representa un escalado global. Las transformaciones para representar {i} con respecto a {i-1} se han de realizar en el orden indicado por la siguiente ecuación [2]:

$${}^{i-1}_i T = \text{Rot}(\hat{X}_{i-1}, \alpha_{i-1}) \text{Trans}(\hat{X}_{i-1}, a_{i-1}) \text{Rot}(\hat{Z}_i, \theta_i) \text{Trans}(\hat{Z}_i, d_i) \quad (8)$$

La cual toma la siguiente forma:

$${}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \cos \alpha_{i-1} \sin \theta_i & \cos \alpha_{i-1} \cos \theta_i & -\sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} d_i \\ \sin \alpha_{i-1} \sin \theta_i & \sin \alpha_{i-1} \cos \theta_i & \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

En la ecuación (9) se sustituyen los parámetros de Denavit y Hartenberg para obtener la matriz de transformación homogénea ${}^{i-1}_i T$ que representa al sistema {i} con respecto al sistema {i-1}.

Tomando como guía la figura 3, los parámetros de Denavit y Hartenberg para el ROBO-WRITER son:

Tabla 1. Parámetros de Denavit-Hartenberg para un robot planar de dos grados de libertad

I	α_{i-1} (grados)	a_{i-1} (metros)	d_i (metros)	θ_i (grados)
1	0	0	0	Θ_1
2	0	L_1	0	Θ_2
3	0	L_2	0	$\Theta_3 = 0$

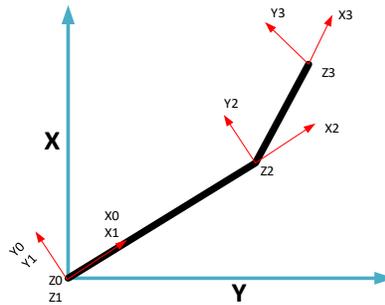


Figura 3. Asignación de los sistemas de referencia de coordenadas

Sustituyendo en la ecuación (9) los parámetros de la tabla 1 de cada uno de los sistemas de referencia de coordenadas, se obtendrán las matrices homogéneas que relacionan los eslabones vecinos: ${}^0_1 T$, ${}^1_2 T$, ${}^2_3 T$. Al multiplicar las matrices homogéneas, se obtendrá ${}^0_3 T = {}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T$ la cual es representada por la siguiente matriz:



$${}^0_3T = \begin{bmatrix} c_1c_2 - s_1s_2 & -c_1s_2 - c_2s_1 & 0 & L_2(c_1c_2 - s_1s_2) + C_1L_1 \\ c_2s_1 + c_1s_2 & -s_1s_2 + c_1c_2 & 0 & L_2(c_2s_1 + c_1s_2) + s_1L_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Sabiendo que

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Entonces igualado los términos de la matriz (10) con la matriz (11) tenemos:

$$\begin{aligned} n_x &= c_1c_2 - s_1s_2 \\ n_y &= c_2s_1 + c_1s_2 \\ n_z &= 0 \\ o_x &= -c_1s_2 - c_2s_1 \\ o_y &= -s_1s_2 + c_1c_2 \\ o_z &= 0 \\ a_x &= 0 \\ a_y &= 0 \\ a_z &= 1 \\ P_x &= L_2(c_1c_2 - s_1s_2) + C_1L_1 \\ P_y &= L_2(c_2s_1 + c_1s_2) + s_1L_1 \\ P_z &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

Las ecuaciones (12) son las ecuaciones de la cinemática directa del manipulador de dos grados de libertad. Especifican como calcular la posición y orientación del sistema de referencia {3} con respecto al sistema de referencia {0} dado a los ángulos de las articulaciones del robot.

2.1.2 Cinemática Inversa

Al controlar un robot se manejan sus articulaciones con el objetivo de controlar la posición y orientación de su extremo digital para así alcanzar el objetivo deseado. Es por ello la importancia de la cinemática inversa. Dada la posición y orientación del extremo final del brazo del robot y de sus parámetros articulares, se pueden calcular los ángulos de cada una de las articulaciones para posicionar el extremo final del robot en la posición y orientación deseada, [2].

El método de la transformada inversa es la técnica que hace uso de las matrices de transformación homogénea determinadas con los parámetros de Denavit-Hartenberg en la solución de la cinemática directa.

En el caso del ROBO-WRITER se inicia por determinar la posición y orientación deseada. Ya conocidos los parámetros de Denavit-Hartenberg para el manipulador de dos grados de libertad, se obtienen las matrices homogéneas que relacionan los eslabones vecinos.

Partiendo de ${}^0_3T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T$, se invierte la matriz homogénea 0_1T y se premultiplica con la misma ecuación, esto da como resultado una nueva ecuación:

$$([{}^0_1T]^{-1}) {}^0_3T = {}^1_2T {}^2_3T \quad (13)$$

Las matrices homogéneas se invierten cada vez que sea necesario hasta haber encontrado los ángulos θ_1 y θ_2 .

Tomando en cuenta la ecuación (13) se realiza el siguiente procedimiento:



$$\begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 & 0 \\ -s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} nx & ox & ax & px \\ ny & oy & ay & py \\ nz & oz & az & pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & L_1 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Al multiplicar renglón por columna en cada matriz e igualando términos, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} C_1 P_x + S_1 P_y &= C_2 L_2 + L_1 \\ -S_1 P_x + C_1 P_y &= S_2 L_2 \\ P_z &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

En seguida se elevan al cuadrado en ambos lados las ecuaciones (15), después las ecuaciones en términos de P_x y P_y se pasan al lado derecho del signo igual y las ecuaciones en términos de L_1 y L_2 se pasan al lado izquierdo del signo igual para posteriormente factorizar la ecuación y finalmente eliminar términos iguales, quedando la ecuación como:

$$P_x^2 + P_y^2 = L_2^2 + 2C_2 L_1 L_2 + L_1^2 \quad (16)$$

Se despeja C_2

$$\frac{P_x^2 + P_y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1 L_2} = C_2 \quad (17)$$

Aplicando el teorema de Pitágoras tenemos que

$$S_2 = \sqrt{1 - C_2^2} \quad (18)$$

Conociendo la fórmula de la tangente y después invirtiéndola, obtenemos el ángulo θ_2

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{S_2}{C_2} \quad (19)$$

Ahora se invierte la matriz homogénea 1_2T y se premultiplica con la ecuación (13), esto da como resultado la siguiente ecuación:

$$({}^1_2T)^{-1} ({}^0_1T)^{-1} {}^0_3T = {}^2_3T \quad (20)$$

Se realiza el siguiente procedimiento, obteniendo lo siguiente:

$$\begin{bmatrix} C_2 & S_2 & 0 & L_1 \\ -S_2 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 & S_1 & 0 & 0 \\ -S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} nx & ox & ax & Px \\ ny & oy & ay & Py \\ nz & oz & az & Pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Se multiplica renglón por columna en cada matriz y al igualar términos se obtiene

$$\begin{aligned} P_x(C_1 C_2 - S_1 S_2) + P_y(C_1 S_2 + C_2 S_1) &= L_2 - L_1 \\ -P_x(C_1 S_2 + C_2 S_1) + P_y(C_1 C_2 - S_1 S_2) &= 0 \\ P_z &= 0 \end{aligned} \quad (22)$$

Aplicando identidades trigonométricas:

$$\begin{aligned} P_x(C_{12}) + P_y(S_{12}) &= L_2 - L_1 \\ -P_x(S_{12}) + P_y(C_{12}) &= 0 \\ P_z &= 0 \end{aligned} \quad (23)$$



De la ecuación $-Px(S12) + Py(C12) = 0$ tenemos:

$$\theta_{12} = \arctg\left(\frac{Py}{Px}\right) \quad (22)$$

Sabemos que el ángulo θ_{12} es una suma de θ_1 y θ_2 por lo tanto:

$$\begin{aligned} \theta_{12} &= \theta_1 + \theta_2 \\ \theta_1 &= \theta_{12} - \theta_2 \\ \theta_1 &= \arctg\left(\frac{Py}{Px}\right) - \arctg\left(\frac{S2}{C2}\right) \end{aligned} \quad (24)$$

Existe otro método aplicable para la obtención de la cinemática inversa el cual es el método gráfico y es utilizado para manipuladores de pocos grados de libertad. El procedimiento consiste en descomponer la estructura del brazo robótico en varios triángulos los cuales ayudaran en encontrar los ángulos de cada articulación.

En la figura 4 se muestra la descomposición del manipulador en dos triángulos para posteriormente obtener las siguientes ecuaciones que provienen del triángulo número uno:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (25)$$

$$\phi = \text{tg}^{-1}(y/x) \quad (26)$$

En el triángulo número dos, se aplica la ley de cosenos y a partir de ahí se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$r^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos \beta \quad (27)$$

$$l_1^2 = l_2^2 + r^2 - 2l_2r \cos \gamma \quad (28)$$

$$l_2^2 = l_1^2 + r^2 - 2l_1r \cos \alpha \quad (29)$$

Se despegan $\cos \alpha$ y $\cos \beta$ para obtener el valor del ángulo α y β

$$\cos \alpha = -\frac{l_2^2 - l_1^2 - r^2}{2l_1r}$$

$$\alpha = \cos^{-1}\left(-\frac{l_2^2 - l_1^2 - r^2}{2l_1r}\right) \quad (30)$$

$$\cos B = -\frac{r^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}$$

$$B = \cos^{-1}\left(-\frac{r^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}\right) \quad (31)$$

Haciendo uso de las herramientas de la geometría plana se obtienen las ecuaciones de los ángulos de cada articulación

$$\theta_1 = \phi - \alpha \quad (32)$$

$$\theta_2 = 180 - \beta \quad (33)$$

Se ha comprobado que la obtención de la cinemática directa e inversa han sido de gran utilidad para encontrar la posición y orientación del brazo robótico y los ángulos de cada articulación.

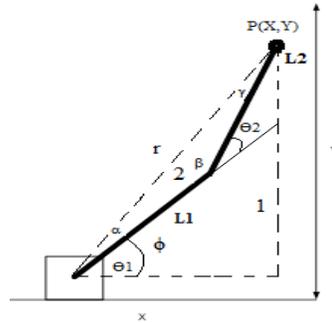


Figura 4. Descomposición del manipulador robótico

2.2 Inteligencia Artificial: Redes Neuronales Artificiales

En el brazo robótico “ROBO-WRITER” se aplicó Inteligencia Artificial mediante el uso de Redes Neuronales Artificiales donde fue utilizado la regresión logística para el reconocimiento de dígitos (números) escritos a mano del cero al nueve. Se usó una red llamada ex3data1.mat la cual contiene cinco mil ejemplos de entrenamiento de dígitos escritos a mano.

Nuestra red neuronal artificial es mostrada en la figura 5. Está constituida por tres capas, una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida.

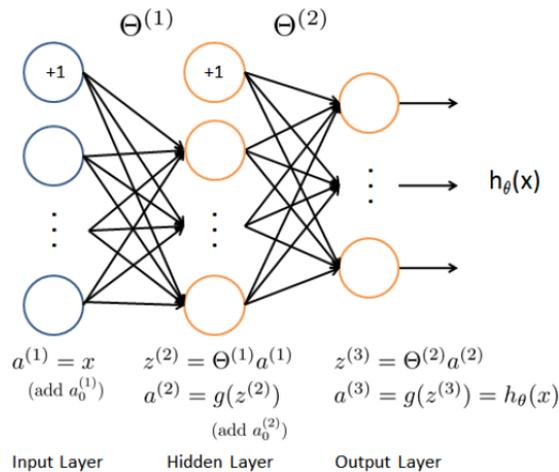


Figura 5. Modelo de una red neuronal

La red neuronal artificial utilizada fue feed-forward la cual se compone de unidades llamadas neuronas y cada una recibe una gran cantidad de entradas mediante interconexiones. Cada interconexión está compuesta por pesos los cuales determinan el conocimiento de dicha red (información) y tienen la propiedad de resolver el problema para el cual la red neuronal fue entrenada. Los pesos son ajustados durante la fase de aprendizaje.

Las entradas son los valores de pixel de las imágenes. El tamaño que manejamos para las imágenes es de 20x20, la cual nos da 400 unidades (neuronas) en la capa de entrada. Se le ha dotado de un conjunto de parámetros de red θ^1 y θ^2 (Theta1 y Theta2) los cuales son los pesos que contienen la información y ya han sido entrenados. Los parámetros tienen dimensiones que están dimensionados para nuestra red neuronal con 25 unidades (neuronas) en la segunda capa y 10 unidades (neuronas) de salida en la última capa (correspondientes a las 10 clases de dígitos).



Para lograr emitir una salida se necesitan tres funciones. La salida de una neurona está dada por una función de propagación la cual consiste en el sumatorio de cada entrada multiplicada por el peso de su interconexión, en el caso que el peso sea positivo, entonces la conexión se denomina excitatoria. Otra función es la de activación que en la mayoría de los casos está acompañada con la función de propagación. Por último, se encuentra la función de transferencia la cual es utilizada para limitar la salida de la neurona (reducir el error), una de las más utilizadas es la función sigmoidea debido a que puede ser derivable.

El proceso de entrenamiento que se realizó fue al implementar el back-propagation el cual va acompañado con la función de costo y la gradiente para la red neuronal.

Primeramente, se implementó el cálculo de feed-forward para posteriormente calcular la salida ($h_{\theta}(x^i)$) para cada ejemplo de i y sumar el costo sobre todos los ejemplos, después se agregó el costo en términos de la regularización. Enseguida se implementó el algoritmo de backpropagation para calcular los gradientes de los parámetros de la red neuronal (sin regularizar). Después de haber verificado que la gradiente calculada para el caso sin regularizar es correcta, se podrá implementar el gradiente para la red neuronal regularizada. El cálculo la gradiente sirve para que el programa sea capaz de entrenar la red neuronal por medio de la minimización de la función de costo y los errores se puedan reducir. La señal de salida se compara con la salida deseada y se calcula una señal de error para cada una de las salidas.

La justificación de porque se usó redes neuronales y no otro algoritmo de inteligencia artificial es debido a que tienen la capacidad de aprender a realizar tareas basadas en un entrenamiento inicial (Aprendizaje adaptativo). De esta forma, la máquina puede aprender a llevar a cabo ciertas tareas mediante el entrenamiento con ejemplos ilustrativos. Además, las redes neuronales permiten organizar por sí mismas lo aprendido que en este caso fueron los primeros diez dígitos numéricos.

Una de las prioridades principales de las redes neuronales es que son capaces de operar en tiempo real. Las redes neuronales trabajan mediante conexiones en paralelo, lo que permite grandes velocidades de transmisión y respuesta casi al instante.

2.3 Interfaz gráfica y programación en MATLAB

Diversos programas o funciones son los que conforman el programa principal, el programa reconoce es el que identifica y selecciona el número que se dibujó en la interfaz, en este programa se encuentran 15 funciones más, cada una con diferente tarea. Además, dentro de este programa se encuentra una función distinta para cada dígito las cuales son nombradas del cero al nueve y cada una contienen una instrucción específica que le mandará una orden al brazo robótico para que plasme el número según la función que haya sido seleccionada. En la figura 6 se muestra un diagrama de flujo el cual explica el funcionamiento del programa en general.

Dentro del programa reconoce se encuentra la función **DigitRecognitionInput** y **DigitRecognizer**.

DigitRecognitionInput: Esta función es la encargada para que se pueda reconocer el número de entrada en otras palabras es el que se encarga de dibujar el número en la interfaz. Esta función contiene 2 funciones más una es **ImageProcessor(RGB)** y **CreatFeatureVector**.

DigitRecognizer: Esta función reconoce el número y además lo muestra en un pequeño recuadro, esta función contiene otra con el nombre de **TrainSystem** la cual es explicada más adelante.

ImageProcessor(RGB): Esta función solo procesa la imagen para que pueda ser guardada en un vector y así tener una mejor manipulación de sus valores (matrices).



CreatFeatureVector: Se crea un vector de la imagen para así saber sus dimensiones y para poder transferir esa información de una forma más rápida y ser guardada.

TrainSystem: Este programa contiene la entrenadora, aquí es donde se le dan ejemplos a la neurona, se dibuja un número y en seguida se registra de manera manual el número que fue dibujado, entre más ejemplos se le den a la entrenadora mayor será el porcentaje de identificación.

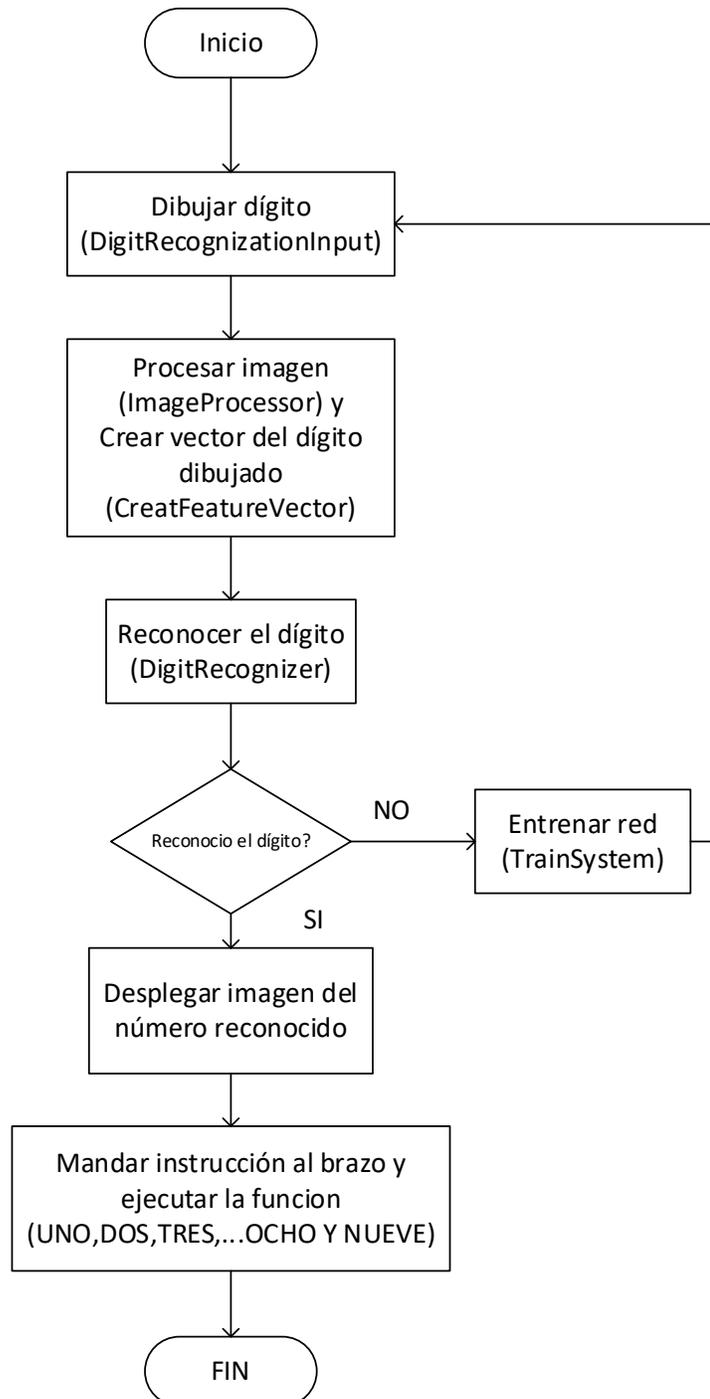


Figura 6. Funcionamiento general del programa

3. Resultados

El usuario ingresa (dibuja) un número del 0 al 9 en una interfaz gráfica, así como es mostrada en la figura 7.

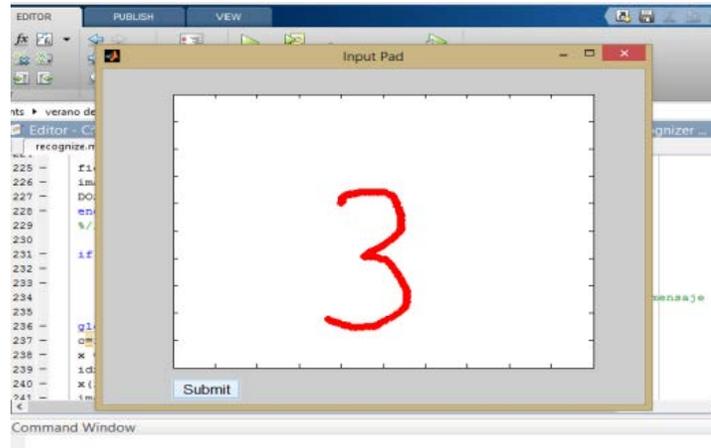


Figura 7. Interfaz gráfica del programa

Una vez que se ingresa el numero en la interfaz gráfica, el programa detecta el tipo de número que se ingresó, compara en su base de datos al que se le sea más semejante y arroja un resultado, el cual debe ser el número que se ingresó y debe ser desplegado en un mensaje y en una imagen como es mostrado en la figura 8.

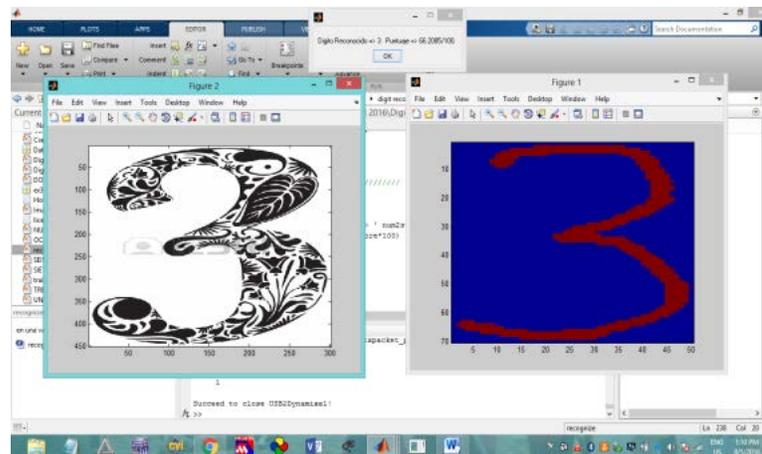


Figura 8. Número detectado por el programa

Al ser detectado el tipo de número que fue escrito por el usuario en la interfaz gráfica, este ejecuta una función la cual funciona como subrutinas en MATLAB, las cuales contienen los códigos predeterminados para cada tipo de número y comienza la escritura como se muestra en la figura 9.

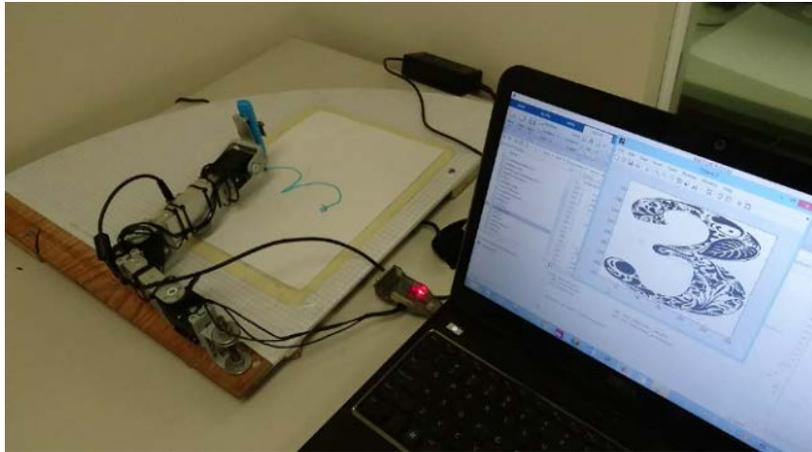


Figura 9. Número resultado del proceso de detección de imágenes

3.1 Tablas

En la tabla 2 se muestra el porcentaje de identificación para cada número. Se arrojan valores que varían debido a que el usuario al ingresar un número en la interfaz gráfica va a variar en tamaño y en ángulo su escritura en los números.

Tabla 2. Porcentaje de identificación de cada número

Número	N° de intentos con diferentes diseños de números				
	1	2	3	4	5
1	97.64%	74.74%	100%	100%	100%
2	100%	40.72%	34.58%	50.78%	46.29%
3	88.82%	100%	100%	81.77%	96.56%
4	55.03%	48.68%	68.36%	60.42%	50.08%
5	57.74%	61.94%	77.44%	82.63%	100.00%
6	100.00%	92.09%	80.58%	100.00%	98.68%
7	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
8	78.76%	69.59%	87.18%	70.45%	58.35%
9	100.00%	68.82%	100.00%	100.00%	67.89%
0	76.83%	83.10%	90.75%	62.35%	66.64%

En la tabla 3 se muestran 5 figuras para cada número las cuales indican las formas en que fueron escritos en diferentes intentos. Fueron las mismas formas que se utilizaron para completar la tabla 2.



Tabla 3. Ejemplos de los diferentes números escritos

Número	N° de intentos con diferentes diseños de números				
	Intento 1	Intento 2	Intento 3	Intento 4	Intento 5
1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	4
5	5	5	5	5	5
6	6	6	6	6	6
7	7	7	7	7	7
8	8	8	8	8	8
9	9	9	9	9	9
0	0	0	0	0	0

4. Conclusiones

Como conclusión de este proyecto se obtuvo como resultado la comprobación del uso de la cinemática directa e inversa en la función de un brazo manipulador en conjunto con la aplicación de la inteligencia artificial para la toma de decisiones de determinados casos, en el cuál es posible aplicar para hacer una secuencia de movimientos que en conjunto se puede complementar para realizar el número que el usuario haya escrito, donde las articulaciones tengan que girar de tal grado que el extremo final del brazo se posicione en un punto donde pueda hacer posible la escritura de dicho numero en el área de trabajo con la que se cuenta.

Se logró trabajar con un código mucho más reducido utilizando las librerías propias de los servomotores, ya que se estaba trabajando con un código más complejo. El uso de estas librerías



también mejoro la movilidad de los servomotores, la precisión mejoro en un cincuenta por ciento y se tuvo una mejor lectura de los sensores internos del servomotor, por lo que mejoro mucho el control de estos servomotores.

Se piensa a futuro realizar un programa el cual detecte el tipo de relieve en el que se encuentre, ya sea ingresar una imagen de un bosque y que por medio de la red neuronal esta detecte que efectivamente es un bosque, desierto, tundra o selva. Este ya sería un proyecto más complejo al igual que lo sería que un programa dibujara una imagen previamente cargada a la base de datos.

Se ha observado que el desarrollar este tipo de proyectos en las diversas instituciones atrae a más personas a adentrarse a este tipo de especialidades, al igual que al poner el practica estos proyectos, inconscientemente las personas que llevan a cabo el proyecto tienen una retroalimentación, adquieren información nueva, nuevas experiencias, las cuales se difunden a través de los medios, de tal manera que el conocimiento no se estanca y surgen nuevas ideas para un nuevo prototipo que puede llegar a ser complejo que el que se tomó como base, o puede tener un funcionamiento totalmente diferente.

Referencias

- [1] Ponce Pedro. *"Inteligencia Artificial con Aplicaciones a la Ingeniería"*, Alfaomega Grupo Editor, México, Primera edición, 2010.
- [2] Pérez Waldemar. *"Planeación de trayectorias óptimas para robots manipuladores utilizando polinomios de octavo grado, algoritmos genéticos y técnicas de procesamiento en paralelo"*, Tesis de doctorado en ciencias en ingeniería eléctrica, UMSNH, Michoacán, 2011.
- [3] Fu K., González R. *"Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence"*, McGraw-Hill Book Company, Estados Unidos de América, Tercera edición, 1987.
- [4] Craig John. *"Robótica"*, Pearson Educación, México, Tercera edición, 2006.



Detección de la posición de articulaciones y punta del dedo y cálculo de los ángulos formados por sus falanges con Kinect V2 y Matlab

Benítez Baltazar Víctor Hugo, Miranda Moya Jesús Armando.

Ingeniería Mecatrónica, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México.

Resumen

La visión artificial ha ido creciendo de forma exponencial en los últimos años, gracias a esto, los instrumentos principales para desarrollar sistemas de este tipo son cada vez más avanzados. Un ejemplo de lo anterior es el sensor Kinect V2, un dispositivo cuya característica principal es su sensor RGB-D, que permite obtener tanto imágenes a color como mapas de profundidad. Este artículo, presenta el problema de estudiar la cinemática de la mano humana a partir de técnicas de visión artificial. Con la visión por computadora, se busca conocer los ángulos formados por los huesos de un dedo que permitan posicionar la punta del mismo en una coordenada (X, Y, Z). Como estrategia principal, se hace uso de marcadores para determinar la posición de las articulaciones del dedo índice y se emplea la técnica de segmentación de colores como base en el programa principal elaborado en Matlab. Una estructura mecánica para llevar a cabo los estudios, es propuesta de tal manera que siempre se cuente con la iluminación óptima que permita un comportamiento exitoso de la aplicación. Aunque el proyecto aún no finaliza, los resultados hasta el momento han sido satisfactorios, pues el programa simula la posición y orientación de las falanges y otorga los ángulos entre ellos.

Palabras clave: Sensor Kinect, Cámara RGB-D, Visión Artificial, Procesamiento Digital de Imágenes, Segmentación de Color, Análisis de la Mano Humana, Matlab.

1. Introducción

La tecnología avanza rápidamente a través de los años y con ella, los instrumentos que nos acercan a estas innovaciones. Una de las técnicas más utilizadas últimamente es la visión artificial o visión por computadora, con la que es posible analizar imágenes, procesar sus datos y obtener resultados planeados.

En el presente trabajo se hace uso del sensor Microsoft Kinect V2, un dispositivo que, aparte de su uso en el mundo de los videojuegos, se ha aplicado en sistemas de carácter industrial y de investigación en áreas como la manufactura, y la robótica.

El objetivo de este proyecto, es el generar una aplicación en Matlab capaz de detectar y calcular los ángulos formados por las falanges de un dedo de la mano y obtener las coordenadas en tiempo real (X, Y, Z) de la punta del dedo estudiado. Este estudio forma parte de un conjunto de investigaciones realizadas por un grupo de estudiantes y maestros de la escuela de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad de Sonora, enfocado en el desarrollo de sistemas biomecánicos relacionados con el comportamiento natural de la mano humana.

El artículo está organizado en dos partes, en la primera se dará una breve introducción al sensor Microsoft Kinect V2 y como segunda parte se presentará la metodología, así como su aplicación en el proceso llevado a cabo para obtener los resultados deseados.

2. Sensor Microsoft Kinect V2

Este instrumento está compuesto por un arreglo de micrófonos y dos cámaras: RGB e Infrarroja (IR), con esta última se puede obtener un mapa de profundidad. Físicamente, sólo se pueden observar la lente de la cámara a color, los micrófonos y los proyectores infrarrojos.

La imagen a color tiene una resolución de 1920x1080 píxeles, mientras que el mapa de profundidad cuenta con una resolución de 512x424 píxeles. Ambas cámaras pueden tener un *frame rate* de hasta 30 FPS. En el caso de la cámara IR, su campo de visión es de 70 grados horizontales y 60 grados verticales con un rango de alcance que va de los 0.5m a los 4.5m [1]. Para obtener la distancia a la que están los objetos del sensor (mapa de profundidad), emplea métodos de tiempo de vuelo o TOF por sus siglas en inglés. En la figura 1 se muestra una imagen del Kinect V2 encendido.

Kinect cuenta con la ventaja de ser un sensor RGB-D de bajo precio y alta tecnología, ya que proporciona imágenes HD y nube de puntos, además puede reconocer hasta 26 articulaciones del cuerpo humano y llega a detectar hasta 6 individuos al mismo tiempo. También, sólo funciona con USB 3.0 aumentando la velocidad de comunicación y disminuyendo la latencia del sensor [2].

Su versatilidad en la programación y la cantidad de paqueterías que existen para trabajar con él es muy amplia a comparación de otras cámaras, pues se puede programar en lenguajes como Java, C#, C++, Python y Matlab. Por ello, es la opción de muchos desarrolladores de código open source. Entre los entornos de desarrollo, o IDE's por sus siglas en inglés. Entre los IDEs más populares para programar el Kinect se encuentran Processing, Matlab y Microsoft Visual Studio.

El sensor Microsoft Kinect V2, no sólo se ha utilizado como herramienta principal para desarrollar sistemas de visión, sino también, como scanner 3D en el área de la ingeniería inversa y el prototipado rápido. Así mismo, se ha usado como instrumento principal en aplicaciones que utilizan comandos de voz.

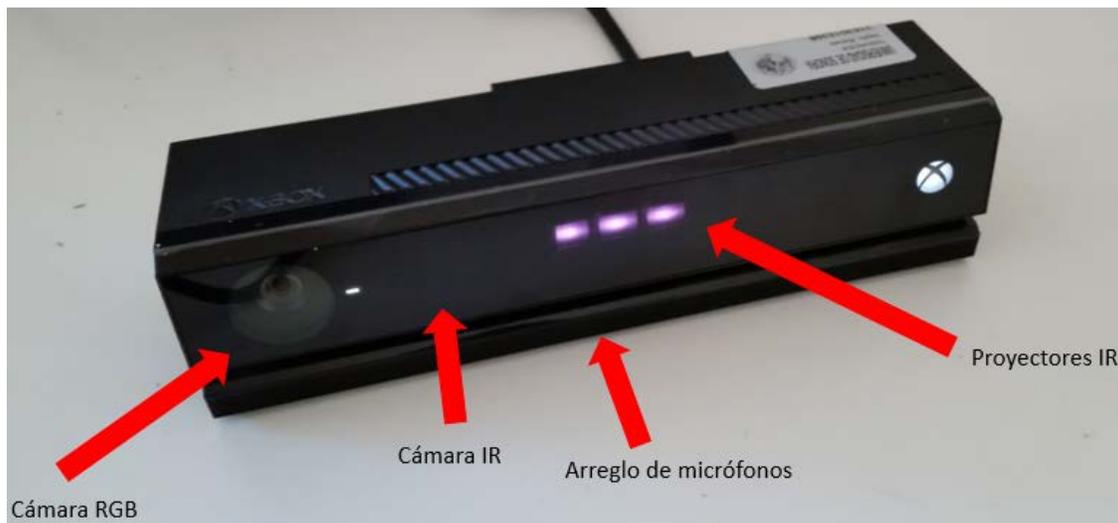


Figura 1. Sensor Microsoft Kinect V2.

3. Desarrollo del proyecto

La metodología empleada para el desarrollo del presente trabajo se muestra en la figura 2.

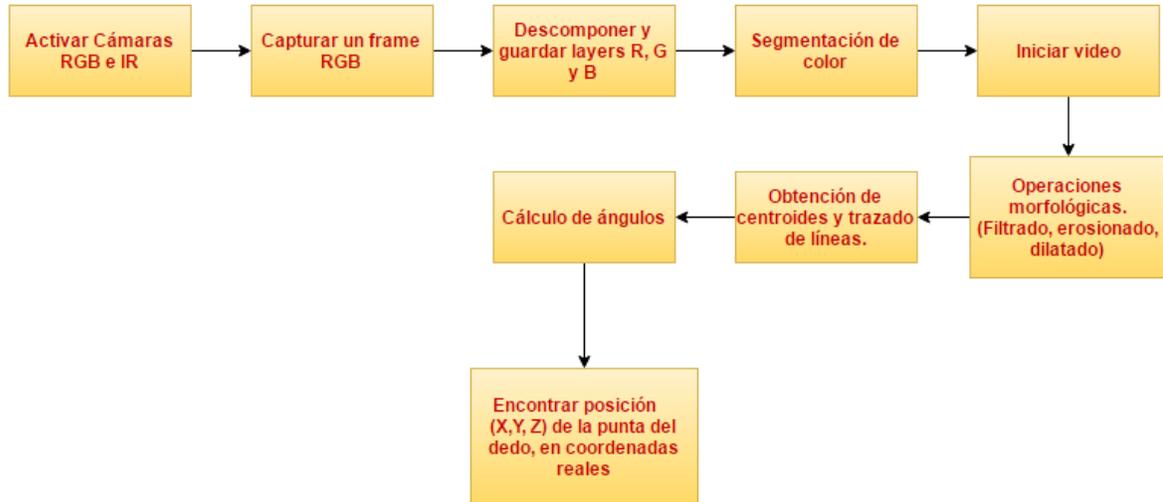


Figura 2. Metodología seguida para realizar el programa base del proyecto.

3.1 Adquisición de imágenes

Para poder realizar la programación del proyecto en la plataforma Matlab es necesario contar con las paqueterías Image Processing y Kinect for Windows Sensor, la primera contiene todas las funciones necesarias para el análisis y procesamiento digital de imágenes; la segunda, permite tener acceso al hardware proporcionado por Kinect, así como a algunas características populares del sensor como el *Body Skeleton Tracking*.

Para adquirir las imágenes, se hace uso de las funciones *videoinput()*, *trigger()* y *getdata()*. *Videoinput* permite inicializar la cámara; *trigger()* da comienzo al registro de datos para el dispositivo de entrada de vídeo; y *getdata()* permite el acceso al *frame* guardado, así como a datos relacionados con la imagen [3]. A continuación, se muestran en las figuras 3.a y 3.b un *frame* de la cámara RGB y uno del mapa de profundidad proporcionado por el sensor Kinect.



(a)



(b)

Figura 3. Imagen a color (a) y mapa de profundidad (b) adquiridos con el sensor Kinect V2. Mientras más oscuro sea el pixel en el mapa de profundidad más cercano se encuentra el objeto de la posición del sensor.

3.2 Segmentación de color

Una de las opciones para realizar la segmentación de color en Matlab, es obteniendo las capas R, G y B del *frame* y guardando cada una de ellas en variables separadas. Con la función *impixel()* el usuario toma una muestra de píxeles del color que desea segmentar, el programa toma esta muestra y obtiene los valores máximos y mínimos de cada capa roja, verde y azul de cada uno de ellos. Con dichos valores, se vectoriza la imagen y se obtiene como resultado una imagen nueva de tipo lógica o binaria, en donde sólo se muestran los objetos que cumplen con los datos extraídos de la muestra. Evidencia de los anterior se observa en las figuras 4.a y 4.b.



Figura 4. Interfaz de salida al momento de usar la función *impixel()* (a) e imagen binaria con color segmentado (b).

En nuestro caso, es necesario que existan marcas en el dedo del usuario con el color que se desea detectar y filtrar. Para ello, se diseñaron e imprimieron tres anillos, la cabeza de estos coincide con la posición de las articulaciones del dedo. En la figura 5 se presentan las piezas mencionadas anteriormente. Con esto, es posible identificar y obtener información referente a la ubicación de cada uno de los puntos de interés. Sin embargo, la imagen binaria resultante no es apta para realizar un análisis, la mayoría de las veces es necesario hacer un tratamiento a base de operaciones morfológicas.



Figura 5. Anillos de apoyo para la detección de articulaciones del dedo.

3.3 Operaciones morfológicas

Las operaciones morfológicas permiten identificar y extraer descripciones importantes de una imagen basándose en propiedades como la forma y la figura de los objetos que existen en la misma. En el procesamiento digital de imágenes, estas operaciones se utilizan por lo regular, en imágenes binarias [4].



Para el desarrollo de este trabajo, se utilizaron las funciones: 1) *bwareaopen()*, la cual, permite eliminar objetos cuya área sea menor a un parámetro especificado en los argumentos de la función (figura 7.a); 2) *imclearborder()*, remueve las figuras positivas que se encuentran en los bordes de la imagen binaria, (figura 7.b) y 3) *bwmorph()*, permite realizar varias operaciones, entre ellas la erosión (figura 7.c) y la dilatación de los objetos (figura 7.d); en la primera, se resta a cada pixel o elemento verdadero de la matriz una cadena de píxeles conectada en 4 u 8 elementos, en cambio para la dilatación, la cadena se suma. Todas estas funciones trabajan bajo el mismo principio: buscar los objetos que existen en la imagen lógica formados por cadenas, ya sea en conexión de 4 u 8 píxeles (figura 6), y eliminar o agregar píxeles blancos o positivos en la imagen, según el algoritmo utilizado.

En la figura 7 se muestran gráficos que explican las funciones anteriores, mientras que en la figura 8 se pueden observar los antes y después del *frame* binario al utilizar las funciones mencionadas.

Como resultado se obtiene una serie de *frames* lógicos que muestran solamente los puntos de interés de una manera más nítida y limpia. Así, la continua extracción de información en tiempo real es más sencilla y confiable.

3.1 Centroides, formación y cálculo de ángulos

En este trabajo, los centroides de los puntos de interés son los datos más importantes y fundamentales en el estudio del dedo. Para obtener los centroides de los objetos, se hace uso de las funciones: *bwlabel()* y *regionprops()*. *Bwlabel()* clasifica los objetos existentes en una imagen binaria, esto lo hace analizando los conjuntos de 1's que hay en la matriz binaria conectados con cadenas de 8 o 4 píxeles (figura 9). *Regionprops()* es una función que permite obtener varias características de los objetos existentes en la imagen binaria, entre ellas, los centroides de estos. De acuerdo a lo anterior, se cuenta con cuatro puntos que se conectan por medio de segmentos de recta, obtenidos con la función *line()*. Cada una de las líneas representa a un vector. En total se tienen tres vectores que corresponden a la falange proximal (V_{AB}), medio (V_{BC}) y distal (V_{CD}) respectivamente (ver figura 10).

Los ángulos a calcular son cinco: los formados entre falanges (alfa y beta) y la inclinación de cada uno de los huesos del dedo (a, b y c). La función trigonométrica a utilizar es *atan2*, pues otorga resultados más precisos que la función seno o coseno, sobre todo, cuando la inclinación del vector se acerca a 0 o 180 grados.

La diferencia entre las funciones matemáticas arcotangente y *atan2*, reside en que la primera, sólo otorga resultados entre $-\pi/2$ y $\pi/2$, mientras que la segunda proporciona valores que van de $-\pi$ a π ; además, da una idea del cuadrante en el que se encuentra el vector. La tabla 1 muestra la diferencia de resultados entre ambas funciones, mientras que la figura 11, muestra de manera gráfica las referencias de medición dichas operaciones.



Figura 6. Conexión de 4 y 8 píxeles.

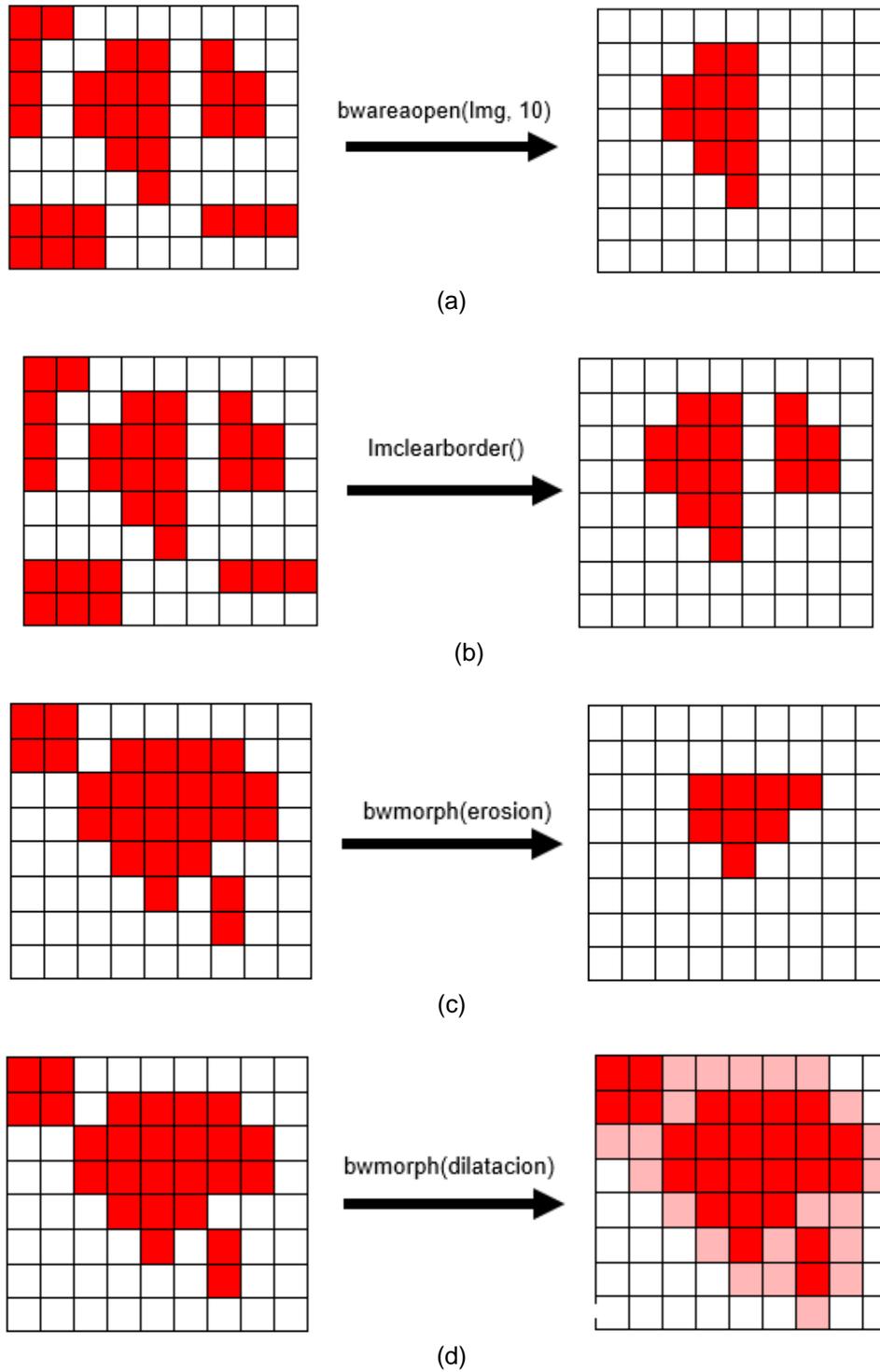
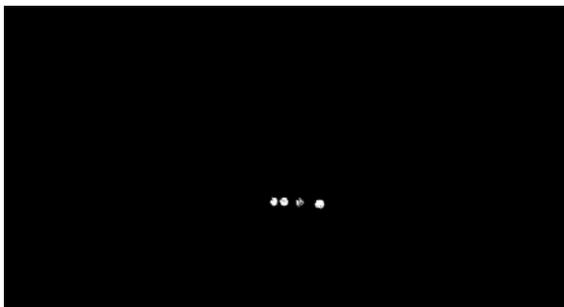


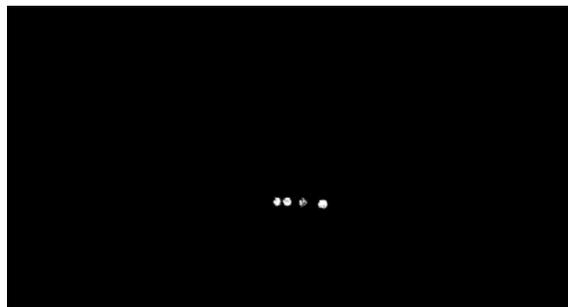
Figura 7. Explicación gráfica de las operaciones morfológicas utilizadas en la programación del proyecto.



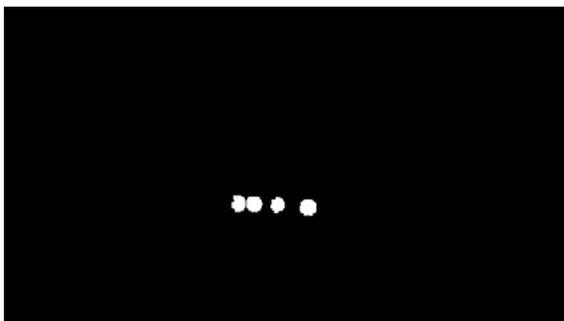
(a)



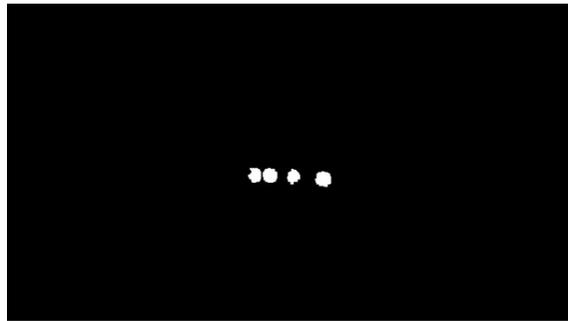
(b)



(c)



d)



e)

Figura 8. Imagen original (a) y el mismo frame si se usa la función: `bwareaopen()` (b), `imclearborder()` (c), `bwmorph(dilatación)` (d), `bwmorph(erosión)` (e)

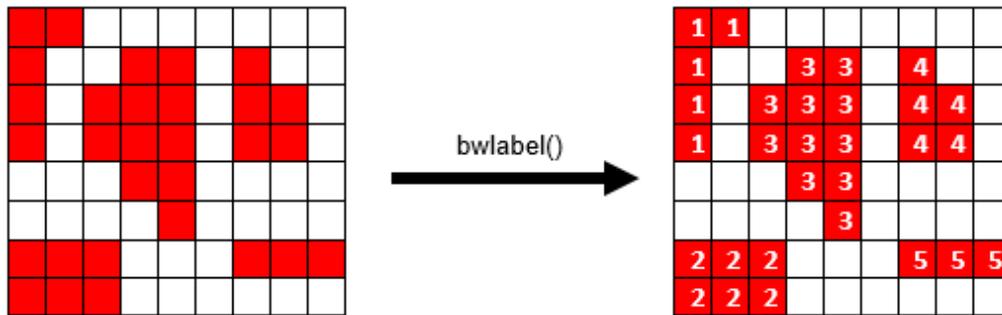


Figura 9. Explicación gráfica de la función bwlabel().

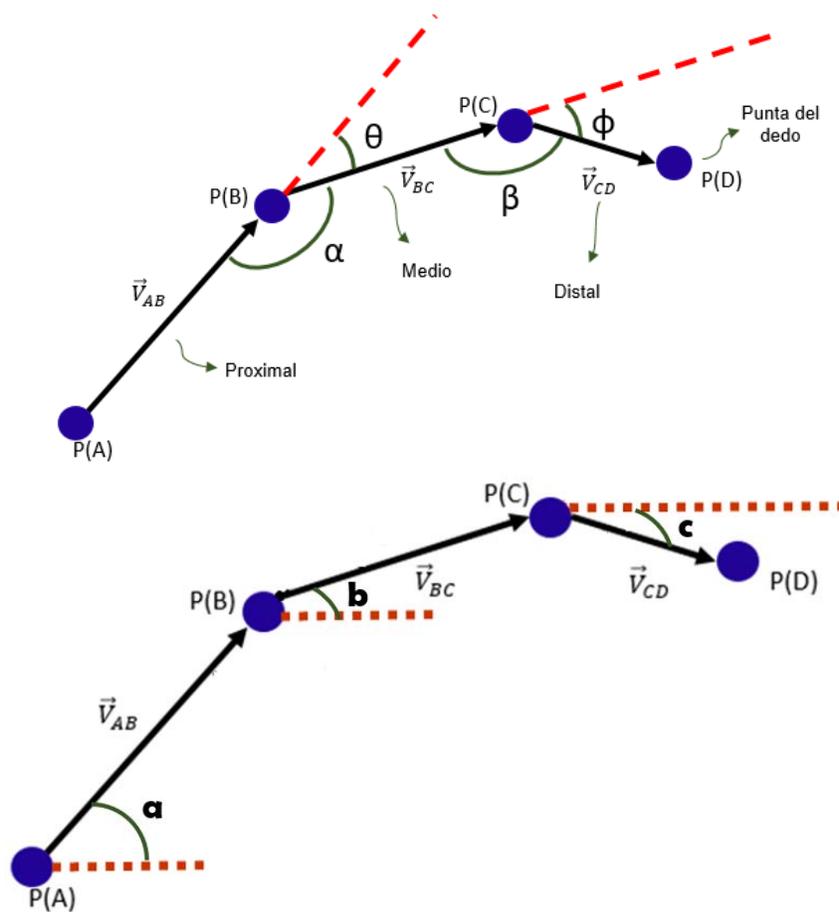


Figura 10. Ángulos formados con la aplicación de centroides y líneas.

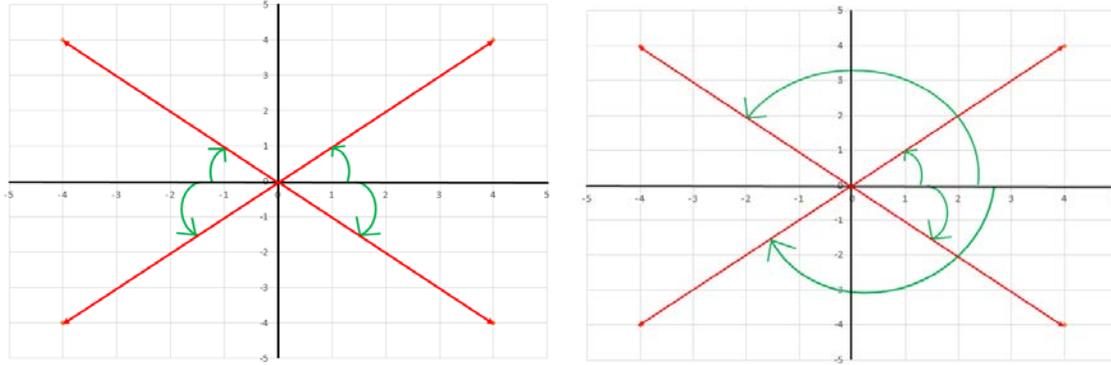


Figura 11. Gráfica correspondiente a la medida de ángulos empleando las funciones atan() (lado izquierdo) y atan2() (lado derecho).

Tabla 1. Comparación de resultados entre atan y atan2.

Cuadrante	X	Y	atan(Y/X)	atan2(Y, X)
I	3	4	53.13°	53.13°
II	-3	4	-53.13°	126.87°
III	-3	-4	53.13°	-126.87°
IV	3	-4	-53.13°	-53.13°

Para obtener alfa y beta se parte de la representación vectorial de las falanges mostrada en la figura 10 y se realiza el procedimiento representado por las ecuaciones (1), (2), (3) y (4). Mientras que para los ángulos a, b y c, se emplean (5), (6) y (7) respectivamente.

$$\theta = \text{atan2}(\|\vec{V}_{AB} \times \vec{V}_{BC}\|, \vec{V}_{AB} \cdot \vec{V}_{BC}) \quad (1)$$

$$\phi = \text{atan2}(\|\vec{V}_{BC} \times \vec{V}_{CD}\|, \vec{V}_{BC} \cdot \vec{V}_{CD}) \quad (2)$$

$$\alpha = 180 - \theta \quad (3)$$

$$\beta = 180 - \phi \quad (4)$$

$$a = \text{atan2}(\vec{V}_{AB_y}, \vec{V}_{AB_x}) \quad (5)$$

$$b = \text{atan2}(\vec{V}_{BC_y}, \vec{V}_{BC_x}) \quad (6)$$

$$c = \text{atan2}(\vec{V}_{CD_y}, \vec{V}_{CD_x}) \quad (7)$$

3.2 Posición (x, y, z) de la punta del dedo en coordenadas reales

Con el toolbox Kinect for Windows de Matlab, es posible obtener una matriz en donde el *frame* a color y su correspondiente mapa de profundidad se combinan dando como resultado una imagen indexada (figura 12), en donde, cada uno de sus pixeles tiene como índice su posición XYZ en metros. El punto de origen del sistema coordenado, se posiciona en el centro de la cámara RGB del sensor. La conversión de unidades para transformar las coordenadas a metros, la realiza el mismo

Kinect dentro de su hardware interno. El dispositivo es calibrado antes de salir de la fábrica, por lo que no es necesario calibrar las cámaras antes de realizar el análisis cinemático.

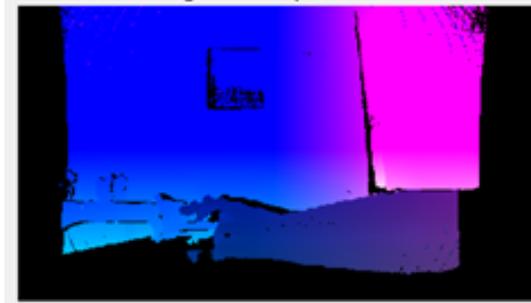


Figura 12. Imagen resultante al combinar un *frame* a color con su mapa de profundidad.

Los colores de la imagen indexada representan la profundidad a la que se encuentran los objetos que aparecen en la escena. También se observan zonas en color negro, esto puede deberse a cualquiera de las siguientes causas: los objetos se encuentran fuera del rango de la cámara de profundidad (0.5 metros a 4.5 metros), hay oclusión causada por alguno de los objetos de la escena, o bien, puede deberse al mismo mapeo de los datos.

Para obtener la posición de la punta del dedo, se toma la coordenada matricial (X, Y) del centroide del objeto que representa al punto de interés en la imagen binaria y se coloca en el argumento de la función de Matlab *impixel* para que obtenga el valor indexado correspondiente a esa coordenada, pero en la imagen indexada. La figura 13, muestra un ejemplo de lo anterior.

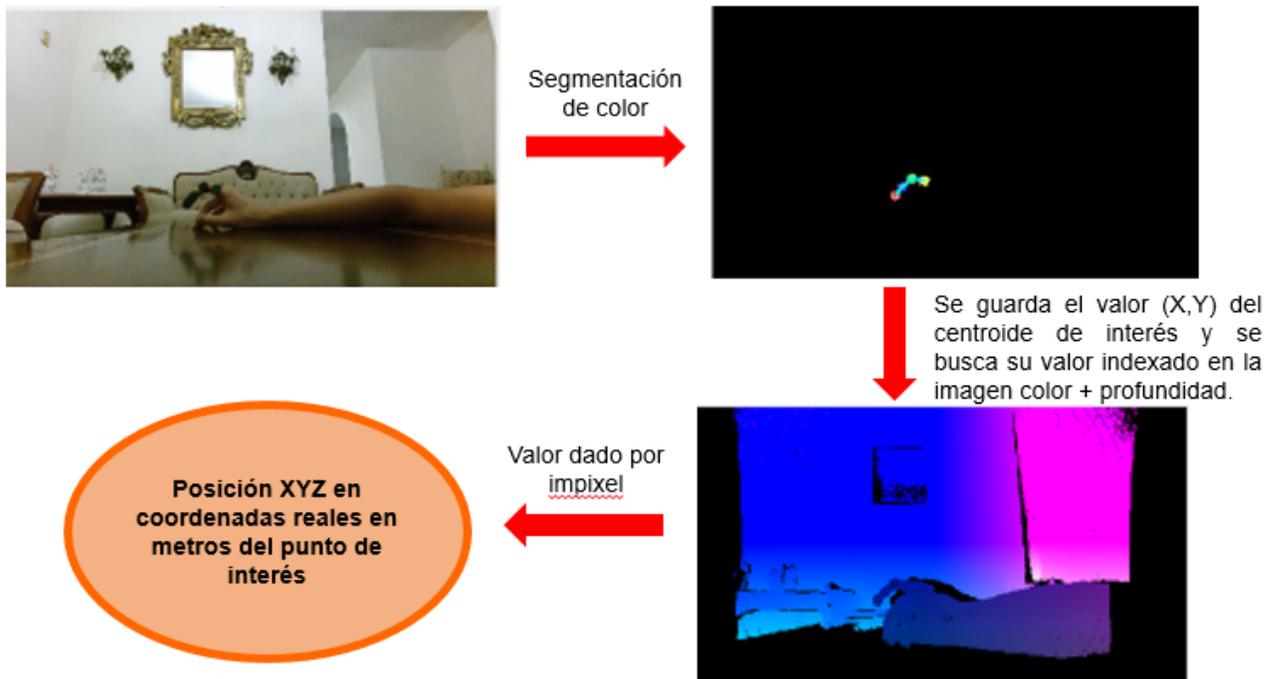


Figura 13. Obtención de posición de un objeto en coordenadas reales.

4. Estructura para la realización de estudios

Como en toda aplicación de visión artificial que utiliza segmentación de color, la iluminación juega un papel muy importante en el desempeño del programa, por ello, se optó por diseñar una estructura mecánica especial para la toma de muestras (figura 13a). Dentro de la estructura se instalarán diodos LED ultra brillantes de color blanco para asegurar una iluminación suficiente al momento de realizar los estudios de la mano.

El material principal para la elaboración del prototipo es madera de tipo MDF por su ligereza, bajo precio y fácil acceso.

El sensor Kinect se colocará en la parte superior del interior de la estructura, a una distancia de 70 centímetros de la base de la misma, tal y como se muestra también en la figura 13. Dicha medida fue considerada porque el ruido en el mapa de profundidad es poco, y el tamaño de los objetos a segmentar es aceptable.

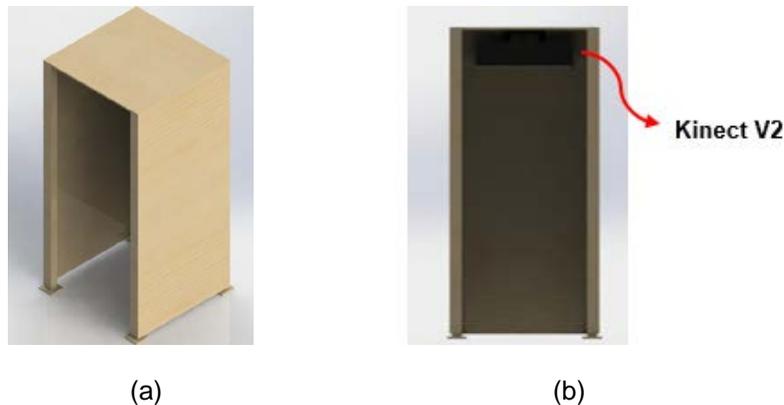


Figura 13. Vista isométrica (a) y frontal de la estructura con sensor instalado (b).

La posición del sensor se planeó con el fin de obtener una vista frontal de la mano en todo momento, para ello, se espera que la pose de la mano del usuario sea similar a la forma que toma la extremidad al momento de tomar un vaso o una figura cilíndrica. Dicha posición es sencilla y cómoda para la persona con la que se realizará el estudio.

Cabe mencionar, que el diseño aún sigue en planeación, por lo que no es el prototipo final que se armará en físico.

5. Resultados

El programa es capaz de detectar y segmentar el color que desee el usuario. Así mismo, permite visualizar la posición de las articulaciones de un dedo mediante los centroides de los objetos segmentados y tratados morfológicamente. En la figura 15, se muestra el momento en el que el programa detecta la posición de las tres articulaciones y la punta del dedo. Las líneas azules representan las falanges del dedo y forman los ángulos a calcular en tiempo real.

Al inicio de la aplicación, se pregunta si el dedo a analizar pertenece a la mano izquierda o derecha; dependiendo de la respuesta, el algoritmo selecciona el objeto que representa a la punta del dedo.

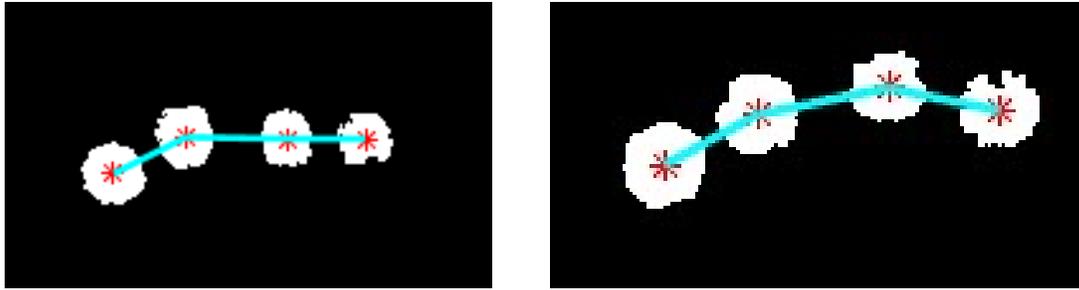


Figura 15. Simulación de la posición de las articulaciones del dedo, así como los ángulos que forman las falanges del mismo.

La ventana principal del programa muestra la imagen a color, la imagen indexada y la imagen segmentada. Los valores de los ángulos son dados en grados y se pueden ver en la pantalla, al igual que la posición de la punta del dedo. Un ejemplo de lo anterior se observa en la figura 16.

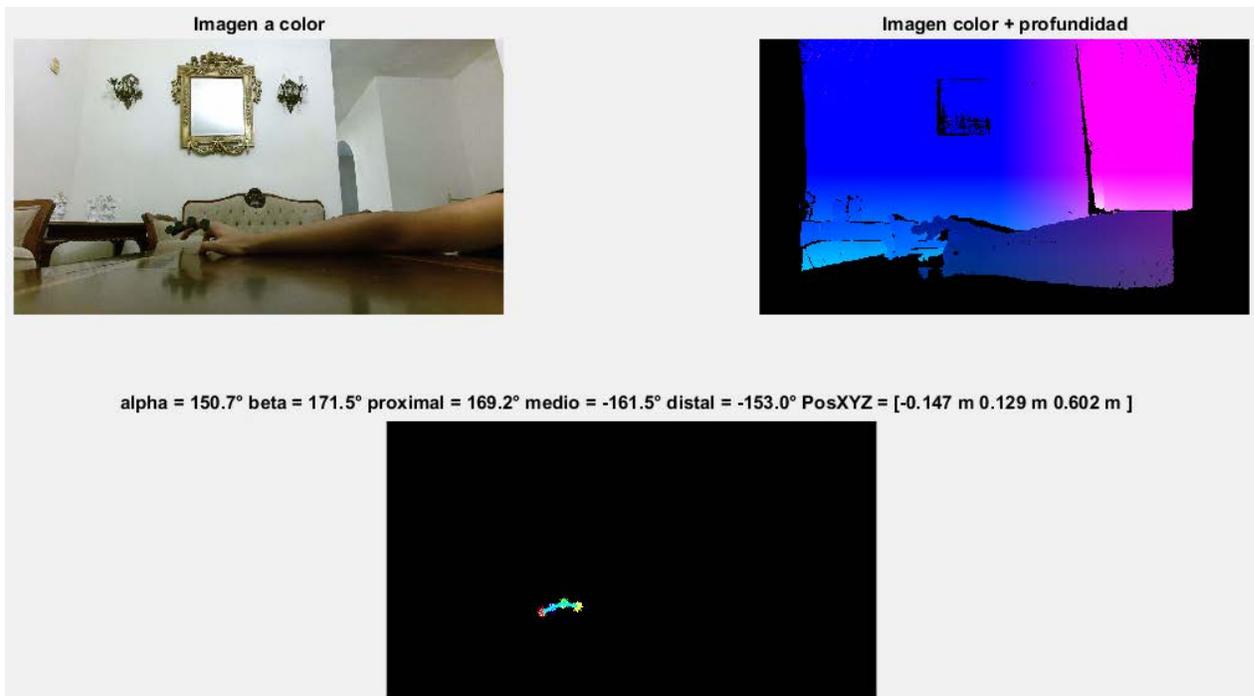


Figura 16. Ventana principal del programa.

El estudio puede analizar hasta 400 imágenes y puede detenerse en cualquier momento. Al finalizar el análisis, se crea un documento de extensión xlsx que contiene los resultados obtenidos a lo largo del programa.

Conclusiones

Este trabajo cumple con las expectativas planteadas, es capaz de brindar información acerca del comportamiento cinemático de un dedo en tiempo real. Sin embargo, aún es necesario buscar maneras de agilizar el procesamiento de las imágenes, pues hay momentos en el que los FPS son muy pocos, haciendo que las mediciones en tiempo real sean lentas. Con el avance del proyecto se trabajará en el algoritmo para hacerlo más apto y robusto y se utilizará como una aplicación de



importancia en investigaciones futuras. El proyecto presentado aquí muestra las mediciones en tiempo real de los ángulos de un dedo de la mano humana, con lo cual se pueden llevar a cabo estudios de sujeción de objetos y con ello entender la cinemática de la mano. Se espera continuar con los estudios para determinar otras variables mecánicas tales como velocidad y aceleración. Es muy importante remarcar que con este instrumento de medición será posible realizar estudios que permitan el diseño de aplicaciones mecatrónicas avanzadas tales como las prótesis.

Referencias

- [1] Lachat, E, Macher, H, Mittet, A, Landes, T, Grussenmeyer, P. “*FIRST EXPERIENCES WITH KINECT V2 SENSOR FOR CLOSE RANGE 3D MODELLING*”. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Volume XL-5/W4, 2015. Página 1, 2015.
- [2] Montserrat, M. *Características Kinect 2* [online]. Kinect for Developers. 2016. Disponible en: <http://www.kinectfordevelopers.com/es/2014/01/28/caracteristicas-kinect-2/>.
- [3] *Matlab documentation* [online]. 2016. Disponible en: <http://www.mathworks.com/help/matlab/>.
- [4] Solomon C, Breckon T. “*Fundamentals of Digital Image Processing. A practical approach with examples in Matlab*”, Wiley - Blackwell, UK, 1era edición, 2011.



Implementación de habilidad de desplazamiento en el robot de servicio SerBot II sobre rampas de acceso para discapacitados

Pérez Segura Eva Karina¹, Avilés Arriaga Héctor Hugo², Hernández Mier Yahir³

Universidad Politécnica de Victoria
Av. Nuevas Tecnologías 5902, Ciudad Victoria, Tamaulipas. México C. P. 871387,
1030062@upv.edu.mx¹, havilesa@upv.edu.mx², yhernandezm@upv.edu.mx³

Resumen

El interés por implantar robots de servicio en ambientes reales ha aumentado considerablemente en los últimos años. Desafortunadamente, existen relativamente pocos desarrollos para la navegación en rampas para sillas de ruedas que están presentes en la mayoría de las construcciones. En la literatura la navegación en rampas se ha estudiado principalmente con robots de tamaño pequeño que simplifican el problema pero que no siempre son adecuados para tareas generales que definen a un robot de servicio. Por tanto, en este trabajo se propone el desarrollo de la habilidad de navegación en rampas para SerBot II, un robot de tamaño natural con locomoción diferencial. El desplazamiento en la rampa se realiza mediante el control de velocidades basado en el modelo dinámico y cinemático del robot y las lecturas de un giroscopio. Los experimentos iniciales muestran la capacidad del robot para subir y bajar una rampa con pendiente estándar de 6% manteniendo constante la velocidad de desplazamiento.

Palabras clave: Robot de servicio, rampa para silla de ruedas, sistema de locomoción diferencial.

1. Introducción

Los robots de servicio son útiles en tareas cotidianas como tirar la basura, cuidar personas o apoyar como guías en escuelas y museos [1], [2]. No obstante, aunque se han realizado avances considerables en este tipo de robots, aún existe la necesidad de mejorar su capacidad para operar en ambientes reales. Por ejemplo, las rampas para sillas de ruedas son comunes en la mayoría de las construcciones actuales y pueden ser utilizadas por el robot de servicio para ampliar su espacio de trabajo. En la literatura, la navegación en rampas suele estudiarse con robots de tamaño pequeño [3] que simplifican el problema general pero que no siempre son adecuados para realizar las tareas de un robot de servicio de mayor tamaño. Así, en este documento se presenta la implementación de la capacidad de navegación en rampas para sillas de ruedas para un robot de servicio de tamaño natural. El robot utilizado es SerBot II, un robot de ruedas con configuración diferencial y una rueda de apoyo (figura 1). Un módulo de control de velocidad basado en un modelo dinámico permite a nuestro robot subir y bajar rampas. El modelo dinámico considera posición, velocidad, aceleración y las fuerzas aplicadas en el robot. La detección de la pendiente se realiza por medio de un sensor inercial de bajo costo. Una vez detectado un ángulo de inclinación se genera un cambio de velocidad que permite al robot recorrer la pendiente a una velocidad constante. El cálculo de odometría permite a SerBot II realizar trayectorias en línea recta. Los resultados experimentales iniciales muestran la efectividad de la propuesta general y la capacidad del robot para subir y bajar una rampa con pendiente estándar de 6%. Este porcentaje es la relación entre altura y distancia que debe tener una rampa para discapacitados según la norma 223 [4].

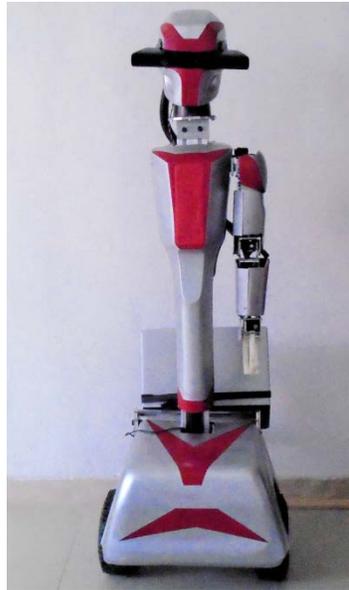


Figura 1. Robot SerBot II.

En la literatura pueden observarse cuatro factores relevantes a tomar en cuenta para analizar robots móviles que navegan en rampas: a) el tamaño del robot, b) el módulo de control, c) los sensores para la detección de la inclinación y d) el sistema de locomoción. El robot bípedo Cornell utiliza un control estocástico con retroalimentación usando una regla de aprendizaje en una red neuronal [5]. El robot esférico desarrollado en [6], utiliza dos sistemas de control independientes para el control de posición y velocidad PID [7]. En [8], el robot humanoide NAO V4 atraviesa una rampa usando una videocámara y un sensor inercial siguiendo un enfoque de aprendizaje kinestésico [9]. El robot oruga desarrollado en [10] utiliza un sensor Kinect para detectar y subir una rampa. La incertidumbre del sistema se maneja mediante controladores difusos tipo 1 y 2. [11], [12]. Por otro lado, los robots con ruedas son los mayormente utilizados debido a que su configuración hardware/software suele ser simple en comparación a sus alternativas. Un ejemplo de robots de tamaño natural son los robots *Tibi* y *Dabo* [13]. Otro ejemplo son las sillas de ruedas autónomas [14], [15], [16]. Sin embargo, la mayoría de las propuestas utilizan robots pequeños como en [17], [18], [19], [20], [21]. Los robots con ruedas se pueden catalogar según su arreglo cinemático en robots diferenciales, tipo Ackerman, de triciclo, configuración síncrona y de tracción omnidireccional. La configuración más sencilla es la diferencial. Algunos robots de configuración diferencial que suben rampas son el robot *Pioneer* [22] y robots Lego utilizados para la competencia *RoboCup Rescue Junior* [23].

2. Metodología

La metodología implementada se muestra en la figura 2. Inicialmente, las lecturas del giroscopio permiten detectar si existe un cambio en la inclinación del robot. Posteriormente un modelo dinámico del robot calcula las fuerzas y la velocidad angular necesaria en cada rueda para que el robot pueda subir o bajar una rampa. Estas velocidades angulares son traducidas a la velocidad lineal del robot en “el mundo” a partir de las ecuaciones cinemáticas de un robot diferencial. Finalmente, la velocidad del robot es convertida a velocidad de motor por medio del *firmware* del robot que es la interfaz entre la computadora con los sensores y actuadores en el robot (en nuestro caso es el microcontrolador Chipkit Max32) [24].

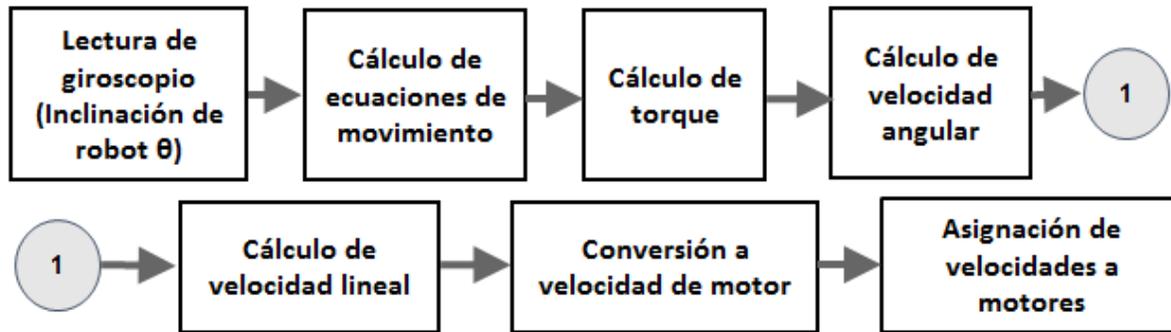


Figura 2. Metodología para dotar a SerBot II con la capacidad de navegación en rampas.

A continuación se describe nuestro robot SerBot II. Se define el modelo dinámico para el desplazamiento en una rampa, las ecuaciones cinemáticas que definen un robot con configuración diferencial y la implementación realizada a nuestro robot.

3. Descripción del robot SerBot II

El robot Serbot II es un robot de servicio de configuración diferencial. Este robot está equipado con: a) 2 motorreductores con *encoders*, 2 ruedas tipo *go kart* para desplazamiento y una rueda para equilibrio, b) un torso para soporte de brazo y cabeza, c) un brazo de 5 grados de libertad con pinzas para sujeción de objetos, d) una cabeza *pan-tilt* con un sensor *Kinect* para visión y reconocimiento de voz, e) botón de paro de emergencia, f) bocina para síntesis de voz, g) un sensor inercial, h) una tarjeta *Chipkit Max32* como *firmware* del robot y finalmente i) una computadora laptop. El robot tiene una plataforma de base *semi-rectangular* con dimensiones de 50 x 45 cm y una altura de tamaño natural de 1.66 m.

La arquitectura de software (ver figura 3) está compuesta en el nivel superior por un coordinador general de toma de decisiones basado en procesos de decisión de *Markov* factorizados [25]. El cálculo de odometría, la interacción por voz y el seguimiento visual están organizados en los módulos de navegación, visión y reconocimiento de voz, respectivamente. En el módulo de navegación se implementó un driver propio para emular el protocolo de comunicación de *Player/Stage* [26].

Actualmente se tienen 5 hilos que son: 1) Driver para comunicación con *firmware* del robot, 2) Cliente que ejecuta órdenes de movimiento, 3) Joystick para la navegación manual del robot, 4) Salida segura de ejecución del programa y 5) Comunicación por *socket* con el nivel de toma de decisiones. La comunicación entre los hilos Driver-Cliente se realizan mediante paquetes de datos. El driver envía un arreglo de datos donde informa el estado de los sensores del robot. El cliente envía órdenes en cola FIFO a los actuadores del robot.

Por último, en la capa inferior se encuentra el *firmware* del robot. El *firmware* comunica a los actuadores quienes ejecutan una acción (motores) y a los sensores los cuales envían su estado actual (giroscopio, infrarrojos, botón de paro).

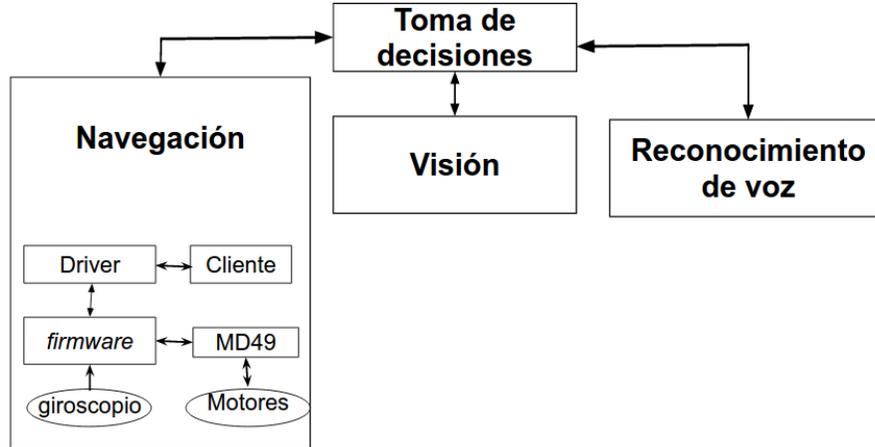


Figura 3. Arquitectura de software.

3.1 Ecuaciones dinámicas en el desplazamiento del robot sobre la rampa

Dada una inclinación θ sobre la que se desplaza el robot (ver figura 4), de cierta masa m , intervienen fuerzas aplicadas sobre el centro de gravedad cg del robot que equivale al peso total en él. El peso total del robot $F_W = mg$, esta es dividida en 2 componentes: $F_{wx} = F_W \sin \theta$ componente que empuja el peso del robot hacia abajo provocando su caída y $F_{wy} = F_W \cos \theta$ que es la fuerza ejercida por el plano sobre el cuerpo. F_f es la fuerza que se opone al movimiento debido a la fricción de contacto entre las ruedas y el suelo. La fuerza normal F_N es la fuerza que ejerce una superficie sobre un cuerpo apoyado sobre el mismo. F_E es la fuerza de empuje necesaria en las ruedas del robot para moverlo por la rampa. Considerando un eje de coordenadas (x, y) en el cual x es paralelo al plano y es positivo en dirección ascendente y el eje y apunta hacia arriba. El análisis de equilibrio en el eje y al no existir desplazamiento ni aceleración en esta dirección la sumatoria de todas las fuerzas en y es igual a cero. Las fuerzas involucradas en este eje son F_N y F_{wy} tal que:

$$F_N - F_{wy} = 0$$

$$F_N = F_{wy}$$

Se sustituye por el valor:

$$F_N = F_W \cos \theta$$

Donde μ es el coeficiente de rozamiento. El movimiento sobre el plano en el eje x es un movimiento acelerado, por lo que se aplica la segunda ley de Newton.

$$\sum F_x = ma$$

Las fuerzas involucradas son F_{wx} , F_f y F_E tal que:

$$F_E - F_{wx} - F_f = ma$$

Dado que el movimiento se considera sin deslizamiento la fricción es cero. $F_f = 0$.

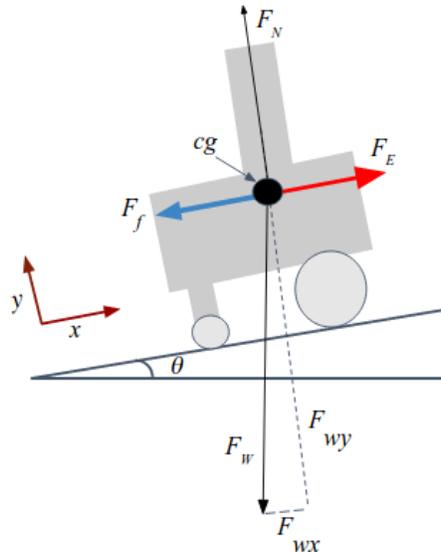


Figura 4. Análisis de fuerzas del robot sobre plano inclinado.

$$F_E = m g \sin \theta + m a$$

$$F_E = m(g \sin \theta + a) \quad (1)$$

La fuerza necesaria para mover al robot F_E es distribuida en los dos motores de tracción del robot. Ambos motores están a una misma distancia $L/2$ del centro de gravedad cg (ver figura 5), tal que:

$$F_E = F_{der} + F_{izq} \quad (2)$$

Considerando una trayectoria en línea recta. El torque en los motores se puede deducir a partir de las ecuaciones 1 y 2:

$$T_{der} = T_{izq} = \frac{F_E \cdot r}{2} = \frac{m(g \sin \theta + a)r}{2} \quad (3)$$

Donde r es el radio de la rueda, T_{der} y T_{izq} son los torques en la ruedas derecha e izquierda respectivamente.

3.2 Ecuaciones cinemáticas de un robot diferencial.

Estas ecuaciones determinan la posición de robot con un sistema de coordenadas (x, y, θ) . La configuración del robot es diferencial (ver figura 5). Las variables involucradas con el movimiento del robot son: V_L velocidad lineal del robot; $\omega_c = \Delta\varphi$ velocidad angular del robot igual a cambio de ángulo de giro del robot; L largo del eje de tracción de una rueda a otra; r radio de la rueda; ϕ ángulo de giro de la rueda y; φ ángulo de giro del robot. El ICC es un punto de referencia de un radio formado por el giro del robot. A partir de este punto se involucran otras variables que son: $P(x_i, y_i)$ y $P(x_f, y_f)$ posición inicial y final respecto a un marco de referencia; R radio del arco que recorre el robot; r_{der} y r_{izq} distancia del ICC al centro de la rueda derecha e izquierda; S distancia del arco del centro del robot y; d_{der} y d_{izq} distancia del arco de la rueda derecha e izquierda (ver figura 6). De acuerdo al sistema de referencia se puede obtener la siguiente relación: $S = R\varphi$.

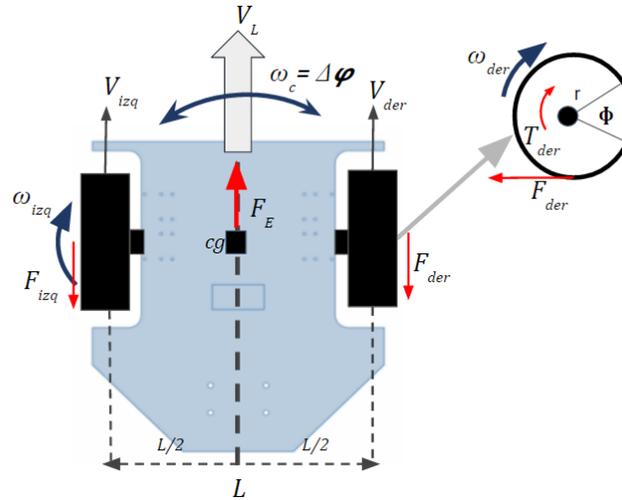


Figura 5. Relación de fuerzas y velocidades en un robot de configuración diferencial.

La velocidad angular del robot es igual al ángulo recorrido en un determinado tiempo.

$$\omega_c = \frac{\varphi}{t}$$

Si $V_L = \frac{s}{t}$ y $S = \varphi \cdot R$ entonces:

$$V_L = \frac{\varphi \cdot R}{t} = \frac{\varphi}{t} \cdot R$$

$$V_L = \omega_c \cdot R \quad (4)$$

Así, V_L y ω_c son proporcionales, se calculan para un punto (x_0, y_0) específico y sólo tienen sentido para este punto. Las distancias del centro del robot a cada rueda derecha e izquierda son:

$$R - R_{der} = -(L/2) \quad (5)$$

$$R - R_{izq} = (L/2) \quad (6)$$

Las velocidades ω_{der} y ω_{izq} son obtenidas de la relación entre la velocidad lineal y la velocidad angular de cada rueda:

$$V_{izq} = r \omega_{izq} \quad (7)$$

$$V_{der} = r \omega_{der} \quad (8)$$

La velocidad lineal y angular del robot se puede obtener a partir de cada una de las ruedas del robot con la relación obtenida de (5) y (6):

$$V_L = \frac{V_{der} + V_{izq}}{2} \quad (9)$$

$$\omega_c = \frac{\omega_{der} - \omega_{izq}}{2} \quad (10)$$

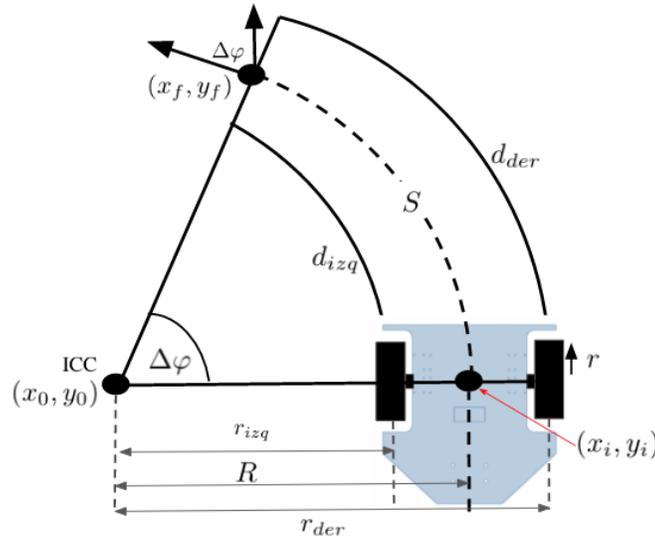


Figura 6. Variables cinemáticas de un robot diferencial para el cálculo de velocidades y posición.

El modelo cinemático del robot es definido como:

$$x' = V_L \cos(\phi) \quad (11)$$

$$y' = -V_L \sen(\phi) \quad (12)$$

$$\phi' = \omega_c \quad (13)$$

4. Implementación.

Una vez realizado el modelo dinámico y cinemático del robot se procede a implementar el módulo de control de velocidad en el Cliente. El Cliente comunica con el firmware del robot como se explicó en la sección 2.1.

Los sensores utilizados son el sensor inercial *Minimu-9* un giroscopio, acelerómetro y compás para la detección de la orientación del robot, provee el ángulo de inclinación del robot θ , este sensor permite saber si el robot se encuentra o no en una inclinación. Al detectar un cambio de inclinación sea positiva o negativa el robot aumentará o disminuirá su velocidad respectivamente. La velocidad es calculada a partir de las ecuaciones del modelo dinámico. Una vez calculadas estas velocidades se envían a los motores (*EMG49*) a través de la tarjeta de potencia *MD49*, esta tarjeta se comunica con el firmware del robot (*ChipkitMax 32*). Para convertir de velocidades de mundo (m/s) a velocidades de motor (0-255) la ecuación general es:

$$V_{motor} = \frac{V_{mundo} * 127}{V_{max}} \quad (14)$$

Donde la velocidad máxima es calculada a partir de la velocidad en los motores. Se obtiene el número de revoluciones máxima por segundo adquiridos en una serie de experimentaciones descritas en [24]. La velocidad máxima del robot se obtiene a partir de dividir la distancia recorrida en 1 segundo entre la distancia transitada en un giro completo del robot.



$$\frac{1550}{1319.472} = 1.17 \frac{vuel}{seg}$$

Este valor en radianes es igual a $7.38 \frac{rad}{seg}$ y es la velocidad máxima a la que se podría desplazar el robot. Con la velocidad máxima calculada se convierte a velocidades de motor con (14).

5. Experimentación y resultados

Para la experimentación se definió que el robot subirá una pendiente de 10 grados de inclinación. La de rampa de prueba se diseñó de acuerdo a la norma 223. Una pendiente de 6 % de inclinación con una longitud de 3.48 m (ver figura 7). Se evaluó si llegó o no al objetivo en términos de posición. Si el robot fue capaz de subir la pendiente, y si realizó un cambio de velocidad. Se colocaron marcas sobre la rampa cada 30 cm para tomar una medición empírica del tiempo recorrido. El desplazamiento del robot sobre la rampa se puede ver en la figura 8(a) a la figura 8(f).



Figura 7. Rampa de prueba con inclinación de 10 grados.

Se realizaron varias repeticiones para evaluar la eficiencia del robot al subir la rampa. Se envió una trayectoria en línea recta de 2 m para que el robot subiera la rampa. El ángulo de inclinación percibido por el giroscopio se ve en la figura 9. Se reciben a 4 muestras por segundo del giroscopio. Al detectar un cambio en la inclinación el cliente envía un cambio de velocidad a los motores calculado a partir de las características del sistema mecánico del robot, lo que hará que con un mayor torque el robot suba la rampa. En la gráfica se puede ver que del segundo 0 al 2.5 segundos el robot recorre una distancia en plano aproximada de 60 cm, aquí su velocidad es la inicial de 0.25 m/s . A partir de que inicia la rampa de 2.5 segundos a 6.3 segundos el robot aumenta su velocidad en los motores para poder subir la rampa. Al terminar la rampa y estar en plano nuevamente el robot regresa a su velocidad inicial. La aceleración en el robot permanece mayormente en cero, aumenta al inicio por efecto de la inercia al iniciar su recorrido, aumenta al iniciar la rampa y desciende al regresar a plano. Al subir la rampa el cliente percibe que hubo una desviación en la posición final esperada. Sin embargo el robot realmente se desvió más de lo percibido. Se midió empíricamente que el robot tuvo una desviación promedio aproximada a 10 cm por los 2 m de la trayectoria recorrida.

El tiempo real promedio en recorrer la rampa fue de 10 segundos y el promedio percibido por el robot fue de 8 segundos. El robot logró subir la rampa con las velocidades calculadas del modelo propuesto. El robot realizó un cambio de aumento en la velocidad al estar sobre la rampa. El voltaje y la corriente en los motores es afectada por el cambio de inclinación como se puede ver en la figura 10. En la gráfica se puede observar que sobre plano la corriente en los motores es aproximada a los 100 mA, al estar sobre la pendiente la corriente en los motores aumenta hasta 4A, esto provoca que el voltaje baje. Si el esfuerzo al subir la pendiente es mayor el voltaje bajará a menos de 16v lo que provocará desconexión en los motores. La velocidad que se aumentó al robot no es a la que se desplazó realmente, sino que al hacer el aumento el robot fue capaz de vencer la pendiente y subir casi a la misma velocidad que en plano (ver tabla I). En

la tabla se pueden observar diferentes mediciones que se hicieron de manera empírica a diferentes distancias para calcular la velocidad real del robot.

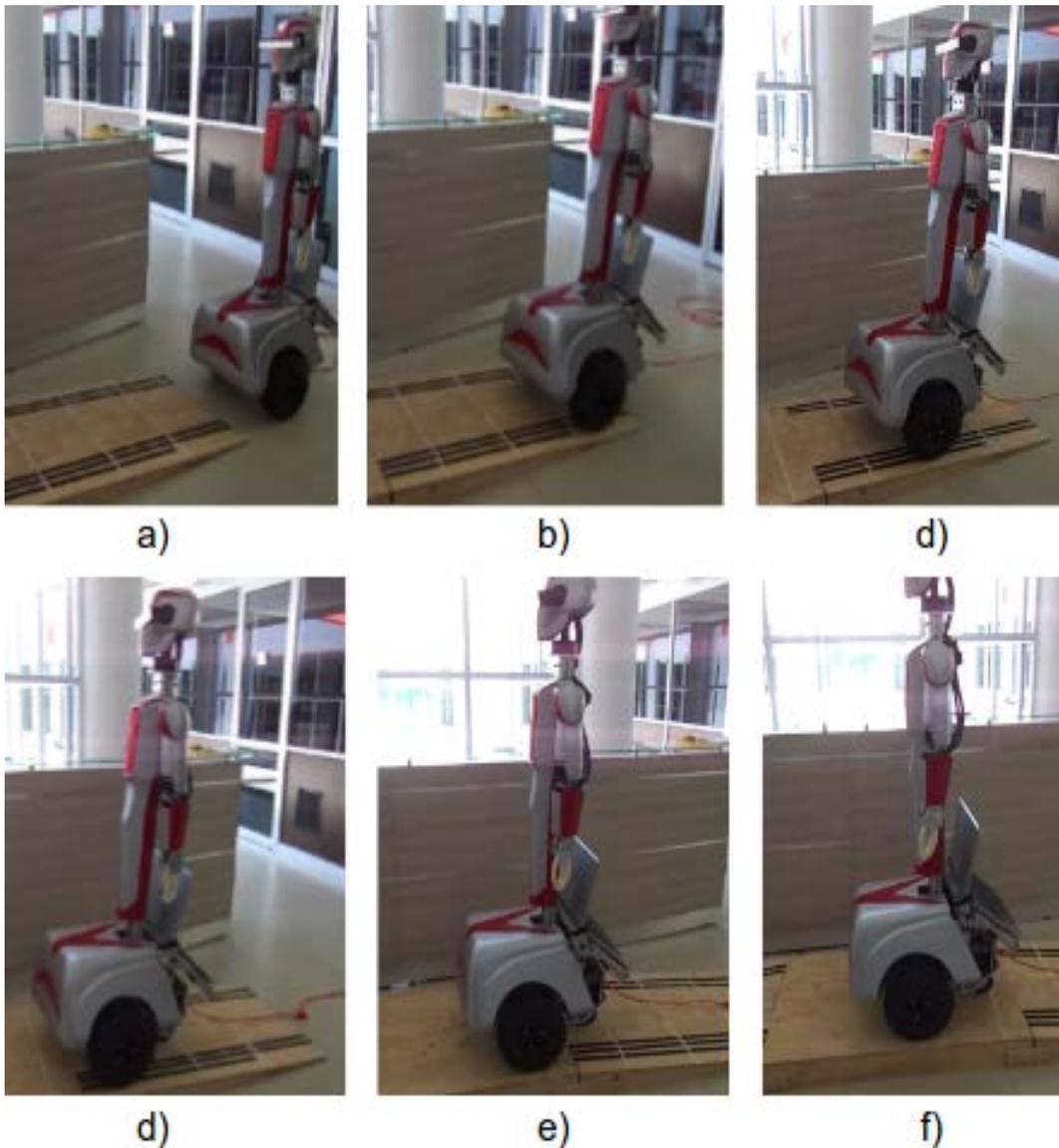


Figura 8. Desplazamiento del robot SerBot II sobre la rampa.

Tabla 1. Relación de tiempo, velocidad y posición medidos con cronómetro.

Distancia	Tiempo	Velocidad
0 m	0 s	0 m/s
60 cm	2.8 s	0.21 m/s
90 cm	3.4 s	0.26 m/s
1.2 m	4.35 s	0.27 m/s
2 m	7.25 s	0.27 m/s
2.5 m	9.65 s	0.25 m/s

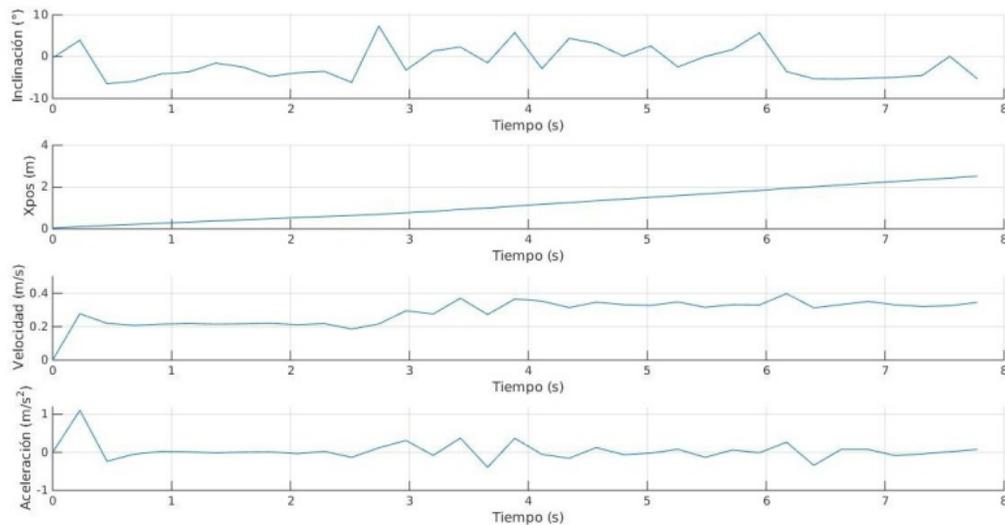


Figura 9. Relación de ángulo de inclinación percibido por el giroscopio y posición, velocidad y aceleración en el robot.

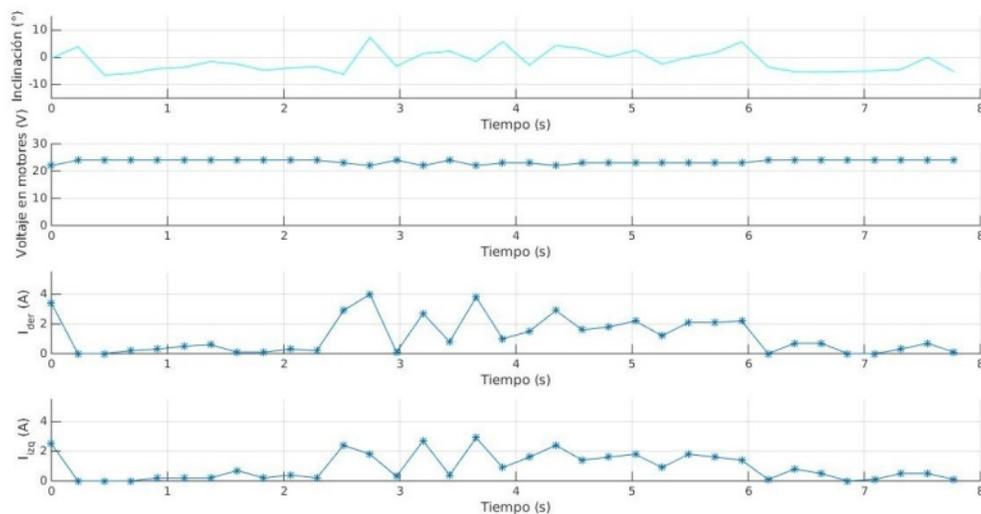


Figura 10. Relación de ángulo de inclinación percibido por el giroscopio y voltaje y corriente en los motores derecho e izquierdo.

6. Conclusiones

Se implementó en el robot de servicio SerBot II la capacidad de desplazamiento en una rampa de prueba de 10 grados. Esta rampa está basada en la Norma 223 de rampas para sillas de ruedas. Inicialmente el robot detecta cambios de inclinación a través de las lecturas del giroscópico, con el modelo matemático analiza las fuerzas que intervienen en el robot y se calculan las velocidades que deben ser aplicadas a los motores.

En la experimentación realizada el control propuesto es evaluado en términos de distancia recorrida por el robot, su tiempo de ejecución y cambio de movimiento que realiza. Se observó que al detectar una inclinación el robot aumentó el torque en los motores lo que provocó que el robot fuera capaz de transitar por la rampa. De no realizar este aumento en la velocidad de los motores el robot no conseguiría subir la rampa. Se midieron tiempos de manera externa con un cronómetro



para comparar el desplazamiento en plano y sobre la rampa. Se demostró que aunque el robot percibía que sobre la rampa avanzaba a una mayor velocidad, este realmente se movía aproximadamente a la misma velocidad que en plano. Al detectar que el robot baja una pendiente este disminuye su velocidad para compensar la aceleración que causa su propia masa al bajar por la rampa. De igual manera el robot percibe ir a una menor velocidad que a la que realmente se está moviendo. Es imprescindible realizar el modelo dinámico del robot para obtener la velocidad adecuada que se debe aumentar, debido a que si el robot se acelera más de lo necesario, podría volcarse.

Al subir una pendiente, el esfuerzo necesario en los motores puede causar sobre picos de corriente y desconexión total de los motores con el cliente, por esta razón se utilizó una fuente externa. Se consideran las ruedas como cuerpos rígidos y sin deslizamiento; no se considera desviación causada por rueda de castor, ya que ésta sólo es vista como apoyo. La implementación del modelo es realizada para el robot SerBot II, y los cálculos realizados sólo aplican al mismo. Este trabajo plantea las bases para implementar la capacidad de desplazamiento sobre rampas para un robot de servicio el cual no necesite de la presencia humana y sin correr algún riesgo de caída.

Como trabajo futuro se espera implementar un algoritmo de aprendizaje, para que el robot sea capaz de recordar la velocidad necesaria para diferentes inclinaciones. Además, implementar un método de corrección para la alineación de la posición, y un control de corrección velocidad a partir de la corriente circulante en los motores.

Agradecimientos

Este trabajo fue asesorado y apoyado por el Dr. Manuel Benjamín Ortíz Moctezuma y el Dr. Liborio Jesús Bortoni Anzures de la Universidad Politécnica de Victoria.

Referencias

- [1] E. V. López, "Tecnología actual de los robots autónomos para limpieza de pisos", *Revista Entérese Boletín Científico Universitario*, Vol. 25, 2008.
- [2] A. Llarena, J. F. Boldt, N. S. Steinke, H. Engelmeyer, and R. Rojas, "Berlinunited home 2013 team description paper", 2013.
- [3] A. Dobra, "General classification of robots - size criteria", *Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD), 23^o International Conference*, págs. 1–6, IEEE, 2014.
- [4] E. E. RUBIO and D. O. de la Federación, "Que establece los requisitos arquitectonicos para facilitar el acceso, transito, uso y permanencia de las personas con discapacidad en establecimientos de atencion medica ambulatoria y hospitalaria del sistema nacional de salud prefacio", *NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-233-SSA1-2003*, 2003.
- [5] T. McGeer, "Passive dynamic walking", *The international journal of robotics research*, Vol. 9, No. 2, págs. 62–82, 1990.
- [6] J. Jian, M. Wang, N. Lv, Y. Yang, K. Zhang, Y. Li, and T. Liu, "Standing-up control and ramp-climbing control of a spherical wheeled robot", en *Control Automation Robotics & Vision (ICARCV), 13th International Conference on*, págs. 1386–1391, IEEE, 2014.
- [7] Y.-F. Peng, C.-H. Chiu, W.-R. Tsai, and M.-H. Chou, "Design of an omnidirectional spherical robot: Using fuzzy control", *Proceedings of the international multiconference of engineers and computer scientists*, Vol. 1, págs. 18–20, Citeseer, 2009.
- [8] C. Lutz, F. Atmanspacher, A. Hornung, and M. Bennewitz, "Nao walking down a ramp autonomously", *IROS*, págs. 5169–5170, 2012.
- [9] S. Oßwald, A. Görög, A. Hornung, and M. Bennewitz, "Autonomous climbing of spiral staircases with humanoids", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, págs. 4844–4849, IEEE, 2011.
- [10] I.-H. Li, W.-Y. Wang, Y.-H. Chien, and N.-H. Fang, "Autonomous ramp detection and climbing systems for tracked robot using kinect sensor," *International Journal of Fuzzy Systems*, Vol. 15, No. 4, pág. 452, 2013.



- [11] M.-S. Wang, Y.-S. Kung, and Y.-M. Tu, "Fuzzy logic control design for a stair-climbing robot", *International Journal of Fuzzy Systems*, Vol. 11, págs. 174–182, 2009.
- [12] J. R. Castro, O. Castillo, P. Melin, A. R. Díaz, and O. Mendoza, "Universal approximation of a class of interval type-2 fuzzy neural networks illustrated with the case of non-linear identification", *IFSA/EUSFLAT Conference*, págs. 1382–1387, 2009.
- [13] A. Corominas Murtra, E. Trulls, O. Sandoval-Torres, J. Pérez-Ibarz, D. Vasquez, J. M. Mirats-Tur, M. Ferrer, A. Sanfeliu, *et al.*, "Autonomous navigation for urban service mobile robots", Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010.
- [14] D. Lockton *et al.*, "Wheelchair drive", *May*, Vol. 14, pág. 170, 2004.
- [15] R. Simpson, E. LoPresti, S. Hayashi, I. Nourbakhsh, and D. Miller, "The smart wheelchair component system", *Journal of Rehabilitation Research and Development*, Vol. 41, No. 3B, pág. 429, 2004.
- [16] M. L. Guzmán, J. P. Pinto, L. F. Reina, and C. A. Esquit, "Non- conventional control and implementation of an electric wheelchair designed to climb up stairs, controlled via electromyography and supported by artificial neural network processing," págs. 344–353, 2013.
- [17] M. Jia, G. Zhou, and Z. Chen, "An efficient strategy integrating grid and topological information for robot exploration", Vol. 2, págs. 667–672, 2004.
- [18] Y. Takita, N. Shimoi, and H. Date, "Development of a wheeled mobile robot octal wheel realized climbing up and down stairs", Vol. 3, págs. 2440–2445, 2004.
- [19] S. Ebrahimi and A. Mardani, "Dynamic modeling and construction of a new two-wheeled mobile manipulator: Self-balancing and climbing" *International Journal of Robotics, Theory and Applications*, Vol. 4, No. 3, págs. 22–34, 2015.
- [20] A. Vourvopoulos and F. Liarokapis, "Brain-controlled nxt robot: Teleoperating a robot through brain electrical activity", *Games and Virtual Worlds for Serious Applications (VS-GAMES), Third International Conference*, págs. 140–143, IEEE, 2011.
- [21] C. R. Terupally, "*Trajectory tracking control and stair climbing stabilization of a skid-steered mobile robot*", PhD thesis, Ohio University, 2006.
- [22] D. Ferguson, M. Likhachev, and A. Stentz, "A guide to heuristic based path planning", *Proceedings of the international workshop on planning under uncertainty for autonomous systems, international conference on automated planning and scheduling (ICAPS)*, págs. 9–18, 2005.
- [23] P. R. Ferreira Jr, F. Dos Santos, A. L. Bazzan, D. Epstein, and S. J. Waskow, "Robocup rescue as multiagent task allocation among teams: experiments with task interdependencies", *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Vol. 20, págs. 421–443, 2010.
- [24] C. Alan, T. Carlos, M.-A. J. Jesús, and A.-A. H. Hugo, "Avances en el desarrollo y construcción del robot de servicio SerBot II", *12º Congreso Nacional de Mecatrónica, 2013*.
- [25] J. Hoey, R. St Aubin, A. J. Hu, and C. Boutilier, "Spudd: Stochastic planning using decision diagrams", 1999.
- [26] B. Gerkey, R. T. Vaughan, and A. Howard, "The player/stage project: Tools for multirobot and distributed sensor systems", *11th international conference on advanced robotics*, Vol. 1, 2003.



Prototipo virtual de un robot móvil multi-terreno para aplicaciones de búsqueda y rescate

García García Rafael Adrian^{1,*}, Arias Montiel Manuel²

¹Universidad Tecnológica de la Mixteca, División de Estudios de Posgrado.

²Universidad Tecnológica de la Mixteca, Instituto de Electrónica y Mecatrónica.

*rafagarcia.0810@gmail.com

Resumen

La robótica de rescate es un campo emergente de la robótica móvil cuyo objetivo se centra en proveer a los rescatistas de herramientas tecnológicas que les permitan tiempos rápidos de acción para dar respuesta y manejar la etapa de búsqueda y rescate durante un desastre de tipo natural o antrópico, salvando así la mayor cantidad de víctimas sin exponer a nuevos peligros a los rescatistas. Este campo presenta diversos retos a resolver dado su reciente desarrollo, tales como: la movilidad, el sistema sensorial, la fuente de alimentación, los sistemas de comunicación, el control e interacción humano-robot, entre otros. En este trabajo se plantea el diseño de un prototipo virtual de robot móvil capaz de operar por aire o tierra, desplazándose en diversos entornos de desastre mediante la reconfiguración de su sistema de locomoción, permitiéndole así, mejorar la movilidad del robot al realizar tareas de búsqueda, reconocimiento y mapeo, y ampliación de cobertura en comunicaciones, las cuales representan un factor clave en los tiempos de monitoreo y acción. Al ser un prototipo virtual, la validación del diseño del robot móvil se encuentra en desarrollo mediante programas computacionales de simulación y análisis de sistemas multicuerpos, lo cual permitirá exportar un diseño validado a un simulador de entornos de desastre para evaluar su comportamiento y rendimiento con el fin de determinar la factibilidad para su construcción física.

Palabras clave: Robótica de rescate, diseño integral, locomoción multi-modal, robot reconfigurable.

1. Introducción

A través de su historia, la humanidad se ha visto afectada por una gran cantidad de desastres. La Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja (IFRC, por sus siglas en inglés) define un desastre como un suceso repentino y catastrófico que altera significativamente el funcionamiento de una comunidad o sociedad y que genera pérdidas humanas, materiales, económicas y/o ambientales [1]. Los desastres suelen clasificarse principalmente en dos tipos: desastres naturales (terremotos, tsunamis, huracanes, deslaves, inundaciones, etc.), y desastres antrópicos u ocasionados por la acción humana o relacionados con la tecnología (bombardeos, incendios, derrames químicos, descarrilamientos, etc.). Sin embargo, independientemente del origen del desastre, las zonas urbanas son las más propensas a sufrir grandes pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales. Además, se considera que aproximadamente el 80% de los sobrevivientes de desastres en zonas urbanas son víctimas superficiales; es decir, personas que permanecen en la superficie de los escombros o zonas visibles por los rescatistas, mientras que el 20% de los sobrevivientes provienen del interior de los escombros, siendo en estos lugares donde se encuentran la mayoría de víctimas [2, 3], por lo que, bajo estas condiciones, el tiempo de localización, atención médica y extracción de víctimas juega un rol muy importante contra la tasa de mortalidad, considerándose primordiales las primeras 48 horas después de ocurrido el desastre. Es por este motivo, que el uso de robots móviles como herramientas y extensiones de las capacidades de los rescatistas ha ganado gran aceptación en los últimos años.



La robótica de rescate o de desastre, es un campo emergente de la robótica móvil cuyo objetivo es proveer de herramientas tecnológicas que permitan a los rescatistas tiempos rápidos de acción para dar respuesta y manejar la etapa de búsqueda y rescate durante un desastre, salvando la mayor cantidad de víctimas posibles sin exponer a nuevos peligros tanto la vida de rescatistas como las víctimas [4]. Al tratarse de un campo nuevo y en constante evolución, las tareas que debe desempeñar un robot de rescate no se encuentran completamente definidas, sin embargo, algunas de las tareas propuestas definidas por especialistas son [2, 3]: búsqueda, reconocimiento y mapeo, remoción de escombros, inspección estructural, evaluación médica en el sitio e intervención, ampliación de cobertura en comunicaciones, soporte logístico. Cada una de estas tareas demanda diversas características en la configuración del robot, por lo que un robot reconfigurable y reutilizable es deseable para el cumplimiento de estas tareas. Otro factor que determina las características que debe poseer un robot móvil es el tipo de desastre ocurrido, el cual influye directamente en su modalidad y tamaño. Existen cuatro modalidades de robots [2]: vehículos terrestres no tripulados (UGV, por sus siglas en inglés), vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés), vehículos submarinos no tripulados (UUV, por sus siglas en inglés), vehículos de aguas superficiales no tripulados (USV, por sus siglas en inglés). Cada una de estas modalidades a su vez se divide en tres tamaños: man-packable (es decir, que pueda ser transportado justo después del desastre y quepa en máximo dos maletas), man-portable (es decir, que pueda ser transportado por un equipo todoterreno ligero a la zona del desastre y operado a lo máximo por dos operarios), y maxi-sized (es decir, que para su transporte sea necesario emplear tráiler o alguna logística de transporte especial), como se puede apreciar en la Figura 1.



Figura 52. Tamaño en los robots de rescate: a) man-packable, b) man-portable, c) maxi-sized.

De los despliegues de robots realizados hasta el año 2014, solo 34 han sido reportados y analizados a profundidad [3], de los cuales solo 29 veces se emplearon en el incidente, mientras que las otras 5 veces no se utilizaron. De estos despliegues se ha recopilado información que sugiere retos fundamentales a resolver en el campo de la robótica de rescate como: movilidad, sistemas de comunicación, control del robot, sistema sensorial y fuente de alimentación. La investigación de estos retos y propuestas se ha incrementado en los últimos años debido a los eventos de competencia internacional para robots de búsqueda y rescate (RoboCup Rescue Robot League) [2-5], así como a la participación de especialistas e instituciones en el área de búsqueda y rescate, algunos robots empleados en eventos de desastre y competición se muestran en la Figura 2. Con base en estas necesidades y retos en el campo de la robótica de rescate, en este artículo se presenta el diseño de un prototipo virtual de robot móvil capaz de operar por aire o tierra, desplazándose entre diversos entornos de desastre mediante la reconfiguración de su sistema de locomoción, permitiéndole así, realizar tareas de búsqueda, reconocimiento y mapeo, y ampliación de cobertura en comunicaciones. Al ser un prototipo virtual, la etapa de validación del diseño del robot móvil se encuentra en desarrollo mediante programas computacionales de simulación y análisis de sistemas multicuerpos (Solidworks y ADAMS/view), lo cual posteriormente permitirá exportar un diseño validado a un simulador de entornos de desastre donde será acondicionado con los sensores adecuados para evaluar su comportamiento y rendimiento con el fin de determinar si su construcción física es factible. El desarrollo del diseño se realiza a través de un enfoque de diseño integral [6], es decir, compartiendo los mismos actuadores.



Figura 53. Robots de rescate empleados en desastres y pruebas de evaluación [2]: a-b) UAVs utilizados en el desastre ocasionado por el huracán Katrina en Mississippi 2005, c) USV utilizado para monitoreo del puente de la Isla de Marco tres días después del huracán Wilma en Florida 2005, d) UUV empleado rutinariamente para búsqueda y localización de carros sumergidos, e) UGV empleado en escenarios de prueba durante la RoboCup, f) UGV empleado para búsqueda después del terremoto en Niigata Chuetsu 2004, g) UGV empleado para pruebas en las instalaciones de California, h) UGV utilizado en el desastre de la mina de Sago en Virginia 2006.

2. Identificación del problema

Al ser la robótica de rescate un campo emergente de la robótica móvil, siendo su primer despliegue oficial en el atentado del World Trade Center el 11 de Septiembre de 2001 [3-5], a cargo del Centro para la Búsqueda y Rescate Asistido por Robots (CRASAR, por sus siglas en inglés) de la Universidad de Texas, empleando los robots del programa de Robots Móviles Tácticos (TMR, por sus siglas en inglés) de la Agencia de Investigación de Proyectos Avanzados de Defensa (DARPA, por sus siglas en inglés). Este y los 28 despliegues posteriores reportados y analizados hasta el 2014, así como las evaluaciones en las competencias internacionales de la RoboCup Rescue Robot League, han servido para proponer las tareas que un robot de rescate de ser capaz de realizar y los retos a los que se enfrenta actualmente este campo de la robótica móvil.

2.1 Tareas de un robot de rescate

Dentro de las tareas propuestas a realizar por los robots de rescate se encuentran [2,3]:

- La búsqueda: cuya actividad se concentra en interiores de estructuras tales como cuevas, túneles, edificios colapsados, y cuyo objetivo es analizar el área en búsqueda de víctimas a fin de extraerlas, o analizar algún tipo de peligro potencial. Para esto se requiere que la tarea se complete en un tiempo rápido y sin comprometer la integridad de las potenciales víctimas o equipos de rescate.
- El reconocimiento y mapeo: cuya actividad es más amplia que la búsqueda, debido a que se debe proporcionar una respuesta a los especialistas que les permita tomar conciencia de las condiciones del entorno que se monitorea, cubriendo la mayor parte del entorno en un tiempo rápido y con una apropiada resolución.
- La remoción de escombros: esta actividad se centra en realizar de manera más rápida las actividades típicas de una grúa y que por cuestiones de tamaño no pueda acceder a determinadas zonas.
- La inspección estructural: esta actividad se desarrolla tanto en interiores como en exteriores, para notificar a los rescatistas si las estructuras son seguras para ingresar o si son potencialmente susceptibles a sufrir un segundo derrumbe.



- La evaluación médica en el sitio e intervención: esta actividad permite a través de robots operados por médicos especialistas, evaluar mediante sensores de diagnóstico, las condiciones en que se encuentran las víctimas y proporcionar medicamentos, líquidos o asistencia médica en el lugar.
- La ampliación de cobertura: en esta tarea, los robots se emplean como repetidores de señal para ampliar los rangos de comunicación inalámbrica necesarios para la comunicación y coordinación de los equipos de rescate.
- Soporte logístico: mediante esta tarea, se automatiza el transporte de equipo o suministros de las áreas de almacenamiento a los equipos o puntos de distribución dentro de la zona de operación, el objetivo es reducir el número del personal dentro de dicha zona y que realiza tareas de rutina.

2.2 Problemas fundamentales y retos en la robótica de rescate

Para desarrollar las tareas mencionadas, los robots de rescate tienen que enfrentar los siguientes retos [2,3]:

- Movilidad: considerado el mayor problema para la categoría de robots terrestres, debido a las condiciones inciertas y no estructuradas del terreno, la existencia de obstáculos o escombros, la capacidad de escalar o subir escaleras, así como pasar dentro de las estructuras colapsadas. En cuanto a los vehículos aéreos, las condiciones de viento son un problema a considerar, así como la cercanía a líneas de tensión eléctrica o árboles de gran tamaño que puedan interferir con su funcionamiento. Para el caso de robots submarinos y de aguas superficiales, el peligro de que cables de tensión caigan en aguas cercanas es un gran riesgo que se debe evaluar.
- Sistemas de comunicación: se requiere que las comunicaciones se realicen en tiempo real para permitir a los operadores y equipo de rescate visualizar lo que ve el robot en ese momento. Sin embargo, la mayoría de las infraestructuras de comunicación se ven perjudicadas en los desastres, a la vez que las que se encuentran disponibles se encuentran saturadas.
- Control del robot: este problema suele dividirse en dos partes, el control de la plataforma, relacionado a la teoría de control y estructura del robot, y el control de actividades relacionadas a la inteligencia artificial. Esto con el fin de dotar de autonomía total a los robots.
- Sistema sensorial: la etapa de sensado y monitoreo se considera de gran importancia debido a que, sin mediciones precisas, el robot puede localizarse en un área de interés, pero no será capaz de dar una respuesta de si encuentra a una víctima potencial o de las condiciones en las que se encuentra el área explorada.
- Fuente de alimentación: el consumo energético ha sido uno de los inconvenientes en cuanto a la estructura y autonomía de los robots. Por razones de seguridad y espacio, es preferible utilizar baterías en lugar de sistemas de combustión. La desventaja es que estas baterías incrementan el peso del robot y su carga es limitada, sobre todo en vehículos aéreos.

2.3 Análisis de despliegues de robots de rescate

Los resultados de los análisis llevados a cabo en los 34 despliegues en zonas de desastre hasta el 2014 demostraron que los robots de tierra (UGV) han estado presentes en 22 incidentes, y los robots aéreos (UAV) y acuáticos (UMV, USV) han estado presentes en 11 y 8 incidentes respectivamente [3]. La mayoría de incidentes donde se han empleado estos robots han sido eventos subterráneos en minas, colapso de edificios (accidentes, terrorismo), terremotos y huracanes, por lo que las modalidades más empleadas y adecuadas de los robots han sido los terrestres y aéreos. En cuanto a las tareas desempeñadas, los robots terrestres han sido más frecuentemente utilizados para búsqueda, reconocimiento y mapeo de las misiones, mientras los robots aéreos donde frecuentemente son más utilizados los de tipo hélice giratoria en lugar de ala fija, son empleados para reconocimiento y mapeo general, y misiones de inspección estructural.



Con base en estos datos, se aborda el reto de mejorar la movilidad en un robot móvil con el objetivo de desempeñar las tareas de búsqueda, reconocimiento y mapeo, y ampliación de cobertura en comunicaciones, capaz de operar tanto en tierra como en el aire, esto mediante el diseño y validación del prototipo virtual de un robot móvil con un sistema de locomoción reconfigurable, la etapa de diseño y validación de los subsistemas que conforman al robot móvil se llevará a cabo en tres etapas, la primera y la cual se presenta en este trabajo es el diseño en Solidworks, la segunda etapa corresponde al análisis de movimiento en un programa de análisis de sistemas multicuerpo (ADAMs/view) y la tercer etapa contempla la exportación del modelo del prototipo hacia un simulador de entornos de desastre, así como su acondicionamiento con sensores que le permitan realizar las tareas propuestas, evaluando su comportamiento y desempeño con el objetivo de determinar la factibilidad de construir físicamente el prototipo.

3. Sistemas de locomoción y enfoques de diseño

El sistema de locomoción de un robot móvil influye directamente en su movilidad, así como en aspectos de maniobrabilidad, evasión de obstáculos y versatilidad. Se define la movilidad como la capacidad de movimiento o desplazamiento del robot en terrenos planos, con escombros, irregulares, escaleras, rampas inclinadas, rutas no convencionales, etc. La maniobrabilidad como la combinación de movilidad debida a restricciones de deslizamiento y movilidad adicional debido a la dirección de ruedas orientables, cuantificable a los 6 grados de libertad. La evasión de obstáculos como la capacidad de negociar la movilidad ante obstáculos en su camino y, por último, la versatilidad como una combinación entre la evasión de obstáculos y la maniobrabilidad, así como la capacidad de transición y adaptación de un entorno a otro [7,8].

Dado que un solo sistema de locomoción no es adecuado para operar en diversas condiciones de terreno o entorno, la estrategia de diseño para nuevos robots con suficiente versatilidad consiste en emplear varios sistemas de locomoción que se adapten a los diversos tipos de entorno. A esta estrategia se le denomina sistemas de locomoción híbridos o multi-modal [6,8,9]. Dentro de esta estrategia existen tres enfoques de diseño, el primero es el diseño aditivo. Este enfoque se refiere a que por cada nuevo sistema de locomoción, se añada un nuevo aparato locomotor, es decir, se agregan más actuadores y estructura adicionales, lo que incrementa tanto el peso como la complejidad del robot. El segundo enfoque es el diseño semi-aditivo, en este caso, solo estructuras pasivas son añadidas para el nuevo sistema de locomoción, sin actuadores adicionales. El tercer enfoque es el diseño integral, donde los mismos actuadores y estructura son empleados para los diferentes modos de locomoción, este enfoque permite minimizar el peso y complejidad del robot.

3.1 Robots terrestres

Los principales sistemas de locomoción presentes en robots para entornos terrestres (UGV) son tres: ruedas, orugas y extremidades. Mientras que los robots con ruedas presentan un mejor desempeño en cuanto a consumo energético y velocidad, así como su fácil diseño mecánico y control, su inconveniente principal es que presentan dificultades cuando operan en terrenos irregulares, con escombros, escalones, superficies discontinuas, entre otras [10,11]. Para abordar este inconveniente, los robots con orugas han sido los más adecuados al poseer una superficie de contacto mayor con el terreno. Sin embargo, su velocidad es limitada y el consumo energético es mayor. Las extremidades o piernas, son un sistema de locomoción inspirado en el movimiento del ser humano, mamíferos e insectos, las cuales poseen una gran movilidad y adaptabilidad tanto en entornos estructurados como no estructurados. Entre sus inconvenientes se encuentran la alta complejidad en sus diseños, sistema de control, movimientos lentos y alto consumo energético. En la Figura 3 se muestran algunos ejemplos de robots móviles con estos tres sistemas de locomoción.

Se han desarrollado robots UGV reconfigurables con ruedas [12-13], (Figura 4a), así como robots reconfigurables con orugas [14-16], (Figura 4b) para operar en entornos irregulares y con pequeños obstáculos.

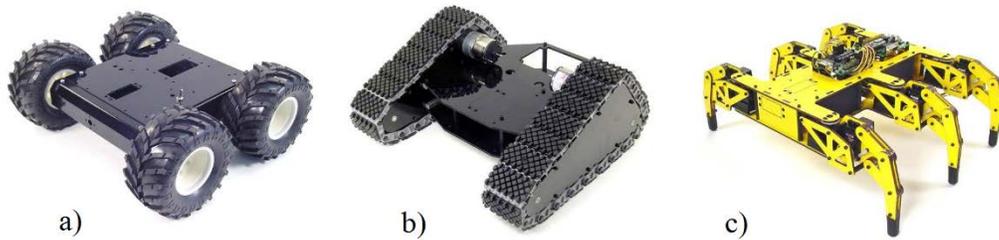


Figura 54. Robots móviles con diversos sistemas de locomoción: a) ruedas, b) orugas, c) extremidades.

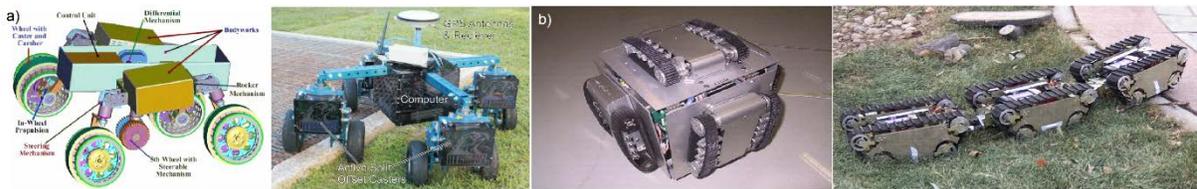


Figura 55. Robots móviles terrestres reconfigurables: a) con ruedas [12,13], b) con orugas [14-16].

Sin embargo, en los últimos años, los investigadores han decidido juntar dos o más sistemas de locomoción a fin de brindar una mayor versatilidad al robot en entornos irregulares y no estructurados. A estos últimos sistemas de locomoción se le denominan híbridos o multi-modales, y se clasifican a partir de los tres sistemas de locomoción previamente mencionados, generando cuatro categorías de locomoción: extremidades con ruedas (L-W, Legs-Wheels) [17-18], extremidades con orugas (L-T, Legs-Tracks), ruedas con orugas (W-T, Wheels-Tracks) [19-22], y extremidades con ruedas y orugas (L-W-T, Legs-Wheels_Tracks) [23]. Algunos ejemplos de estos robots con sistemas de locomoción híbridos se muestran en la Figura 5.



Figura 5. Robots con sistemas de locomoción híbridos: a) extremidades con ruedas (L-W) [17], b) extremidades con orugas (L-T), c) ruedas con orugas (W-T) [19], d) extremidades con ruedas y orugas (L-W-T) [23].

Una comparativa entre los sistemas de locomoción de la Figura 3 y Figura 5 se presenta en [10], el autor define 10 características principales a evaluar de los sistemas de locomoción, las cuales se muestran en la Tabla 1. Las primeras 7 características son cuantificables y se refieren al desempeño del robot, mientras las últimas describen la complejidad del sistema.



Tabla 6. Descripción de las características consideradas en la comparación de los sistemas de locomoción [10].

Características	Definición
Velocidad máxima	Velocidad máxima en superficies planas en ausencia de obstáculos.
Cruce de obstáculos	Capacidad de cruzar obstáculos con formas aleatorias en entornos no estructurados.
Subir peldaños/escaleras	Capacidad de subir peldaños individuales y escaleras en entornos estructurados para los seres humanos.
Escalar pendientes	Capacidad de escalar pendientes con un coeficiente de fricción mayor a 0.5.
Operación en terrenos suaves	Capacidad de operar en terrenos suaves (arena).
Operación en terrenos irregulares	Capacidad de operar en terrenos irregulares (terreno con hierba, terreno rocoso).
Eficiencia energética	Eficiencia energética en condiciones normales de operación, en terrenos planos y compactos.
Complejidad mecánica	Nivel de complejidad de la arquitectura mecánica.
Complejidad de control	Nivel de complejidad del sistema de control (Hardware y Software).
Disposición de tecnología	Nivel de madurez en las tecnologías empleadas para la realización del sistema.

De esta comparativa se aprecia que el sistema de locomoción híbrido ruedas con orugas (W-T) se encuentra en el promedio de desempeño entre las características evaluadas, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 7. Comparativa de las características de los sistemas de locomoción [10].

Sistema de locomoción Características	Ruedas (W)	Orugas (T)	Extremidades (L)	Híbrido (L-W)	Híbrido (L-T)	Híbrido (W-T)	Híbrido (L-W-T)
Velocidad máxima	Alta	Mediana/Alta	Baja (caminata estática) a mediana (caminata dinámica)	Mediana/Alta	Mediana	Mediana/Alta	Mediana/Alta
Cruce de obstáculos	Baja	Mediana/Alta	Alta	Mediana/Alta	Alta	Mediana	Alta
Subir peldaños/escaleras	Baja	Mediana	Alta	Alta	Alta	Mediana	Alta
Escalar pendientes	Baja/Mediana	Alta	Mediana/Alta	Mediana/Alta	Alta	Mediana/Alta	Alta
Operación en terrenos suaves	Baja	Alta	Baja/Mediana	Baja/Mediana	Mediana/Alta	Alta	Mediana/Alta
Operación en terrenos irregulares	Baja	Mediana/Alta	Alta	Alta	Alta	Mediana/Alta	Alta
Eficiencia energética	Alta	Mediana	Baja/Mediana	Mediana/Alta	Mediana	Mediana/Alta	Mediana/Alta
Complejidad mecánica	Baja	Baja	Alta	Mediana/Alta	Mediana/Alta	Baja/Mediana	Alta
Complejidad de control	Baja	Baja	Alta	Mediana/Alta	Mediana/Alta	Mediana	Alta
Disposición de tecnología	Completa	Completa	Completa/en progreso	Completa	Completa	Completa	Completa

3.2 Robots terrestres y aéreos

Entre los robots que implementan un sistema de locomoción capaz de operar tanto en tierra como en el aire, principalmente se han desarrollado bajo el enfoque aditivo [24-26] y semi-aditivo [27-33], algunos de estos robots se muestran en las Figuras 6 y 7. Es importante mencionar que su estructura es diseñada con un sistema de locomoción primario y uno secundario.

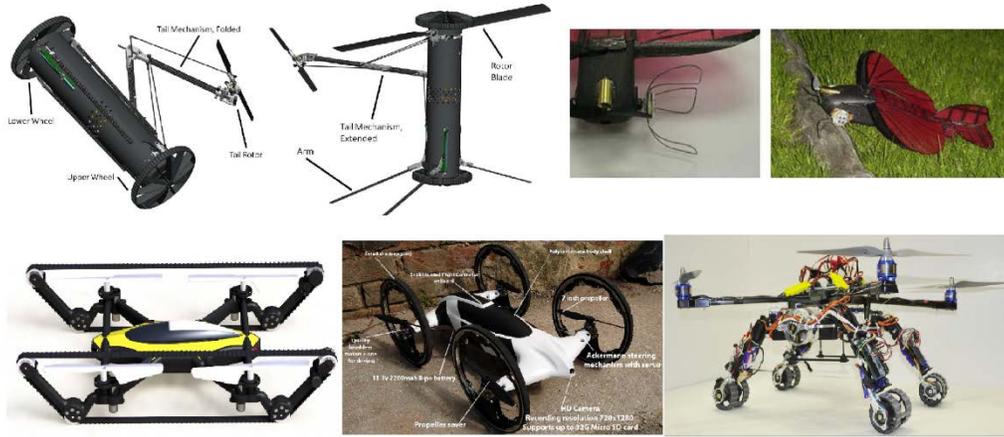


Figura 6. Robots móviles con sistemas de locomoción terrestre-aérea bajo el enfoque aditivo [24-26].



Figura 7. Robots móviles con sistemas de locomoción terrestre-aéreo bajo el enfoque semi-aditivo [27-33].

En el caso de los robots bajo el enfoque de diseño integral, la mayoría de los sistemas de locomoción se encuentran biológicamente inspirados, en la Figura 8 se muestran dos robots cuyo sistema de locomoción se encuentra basado en la capacidad de saltar y sostener su vuelo, el primero inspirado en un murciélago [34,35]. Un tercer diseño de robot denominado DALER v11 [6], capaz de volar, suspenderse en el aire y operar en tierra, se encuentra nuevamente inspirado en el sistema locomotor de un murciélago, como se muestra en la Figura 9.



Figura 8. Robots basados en el enfoque de diseño integral, el robot de la izquierda se encuentra inspirado en la locomoción de un murciélago, ambos son capaces de saltar y planear [34,35].

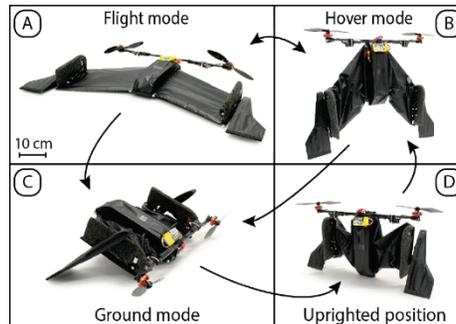


Figura 9. Robot DALER v11 con sus distintos modos de locomoción y la transición entre ellos [6].

4. Especificaciones de diseño para el robot multi-terreno

Una vez estudiado el estado del arte de la robótica de rescate y la tendencia en el diseño de sistemas de locomoción híbridos o multi-modales que permiten a un robot móvil operar y adaptarse a diversos entornos, las especificaciones a considerar en el diseño del prototipo virtual de robot móvil son las siguientes.

- Realización de tareas de búsqueda, reconocimiento y mapeo, y ampliación de cobertura.
- Operación en los entornos terrestre y aéreo.
- Rango de tamaño tal que pueda ser fácilmente transportado a la zona de desastre y operado por una persona (man-packable).
- Alta movilidad, maniobrable, versátil, estable, simétrico, auto-reconfigurable.

Dado que las tareas pueden ser intercambiables, en este trabajo no se hace énfasis en la carga de trabajo o cantidad de sensores a emplear, únicamente se añadirá un peso extra de 2 kg correspondiente a sensores, fuentes de alimentación y circuitos de control para fines de análisis en el movimiento, por lo que los esfuerzos se centrarán en el diseño mecánico y la validación de los movimientos en el programa de análisis de sistemas multicuerpos ADAMS/view, para finalmente exportar el robot móvil a un programa de simulación de entornos de desastre y realizar pruebas normalizadas en la evaluación de movilidad terrestre y aérea. Esto último se encuentra en fase de desarrollo y se plantea como trabajo a futuro en este artículo.

El diseño mecánico del sistema se divide en 5 subsistemas como se muestra en la Figura 10, en donde también se muestran algunas alternativas que pueden ayudar a satisfacer las especificaciones establecidas. Analizando la información de la Tabla 2, se observa que la configuración entre sistemas de locomoción ruedas y orugas (W-T), presentan un desempeño promedio tanto en movilidad como complejidad del sistema. Por lo cual, éstas dos características se eligen como las candidatas para operar en el entorno terrestre, para el caso del sistema de locomoción aérea, las hélices rotatorias se eligen como la solución ideal para operar tanto en



espacios interiores como exteriores y que por cuestiones de espacio requiera de un despegue vertical. Los restantes subsistemas son analizados en la siguiente sección.

5. Diseño e integración de los subsistemas del prototipo

El primer subsistema desarrollado es el de locomoción terrestre-aérea basada en ruedas y hélices. Con el fin de ofrecer una mejor movilidad y maniobrabilidad al robot móvil, se emplearon ruedas omnidireccionales tipo mecanum, las cuales han demostrado ser una opción viable en terrenos irregulares [36]. El diseño de estas ruedas contempla 48 rodillos, los cuales permiten obtener una rueda denominada sin marco y conducida por una cremallera circular interior, brindando así, un espacio suficiente para localizar las hélices del sistema de locomoción aérea, cómo se muestra en la Figura 11a.

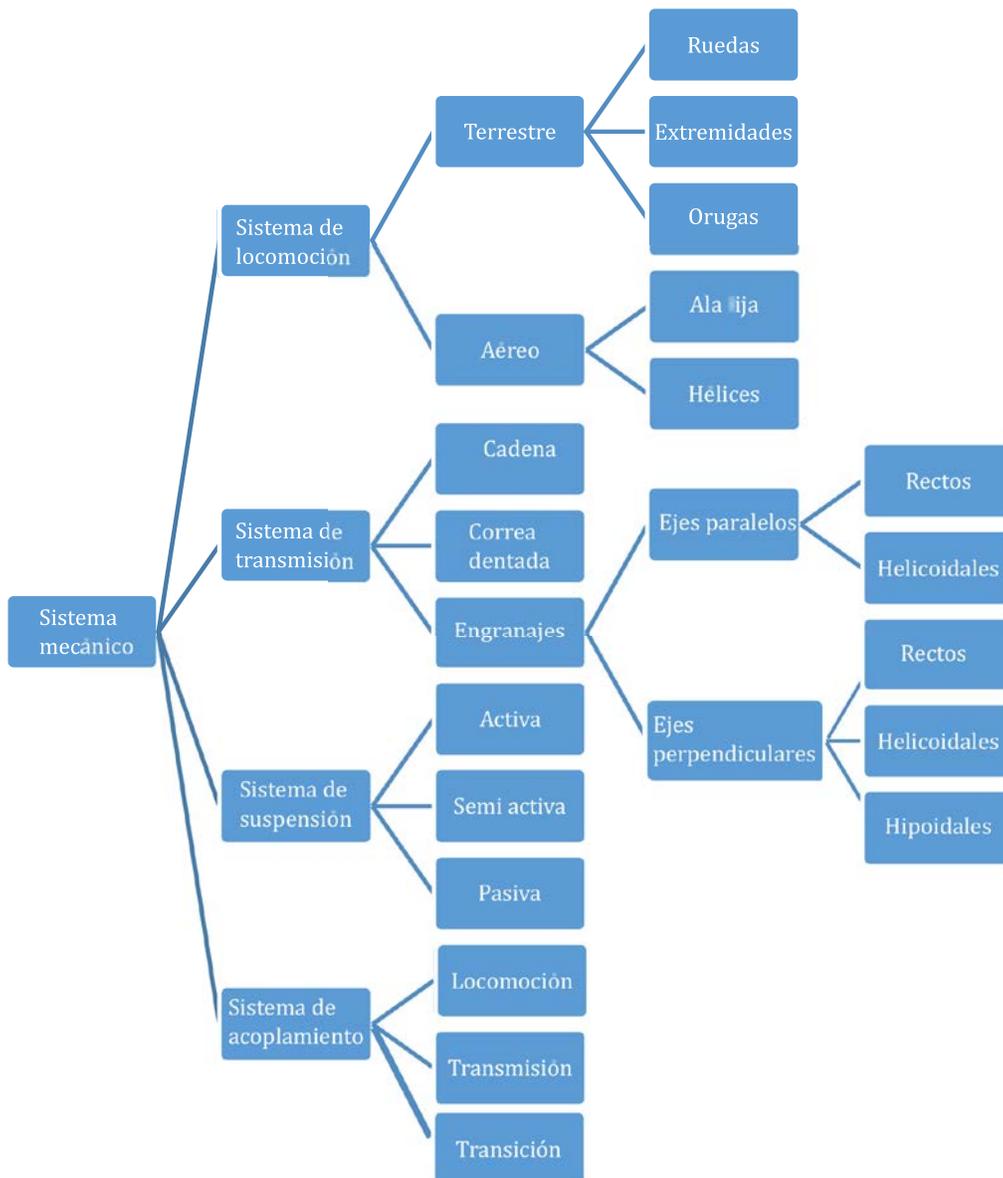


Figura 10. Esquema de los componentes principales del sistema mecánico del robot.



Para el subsistema de transmisión de movimiento generado por los motores, se opta por el uso de engranes, los cuales además otorgan el par de torsión para el movimiento. La elección de montar los motores en el interior del robot requirió el uso de caja de engranes cónicos rectos para brindar un giro de 90° en la transmisión de movimiento. Este subsistema se encuentra a su vez acoplado a dos subsistemas más: el subsistema de suspensión, el cual se compone de dos amortiguadores y es el encargado de hacer que la rueda se encuentre la mayor parte del tiempo en contacto con el terreno, así como de absorber los impactos generados por las irregularidades del entorno, y el subsistema de acoplamiento de los subsistemas de locomoción, el cual queda comprendido de dos embragues electromagnéticos los cuales activan el movimiento de salida de la rueda omnidireccional para la operación en tierra o de las hélices para la operación en el aire. Estos subsistemas se muestran en la Figura 11b.

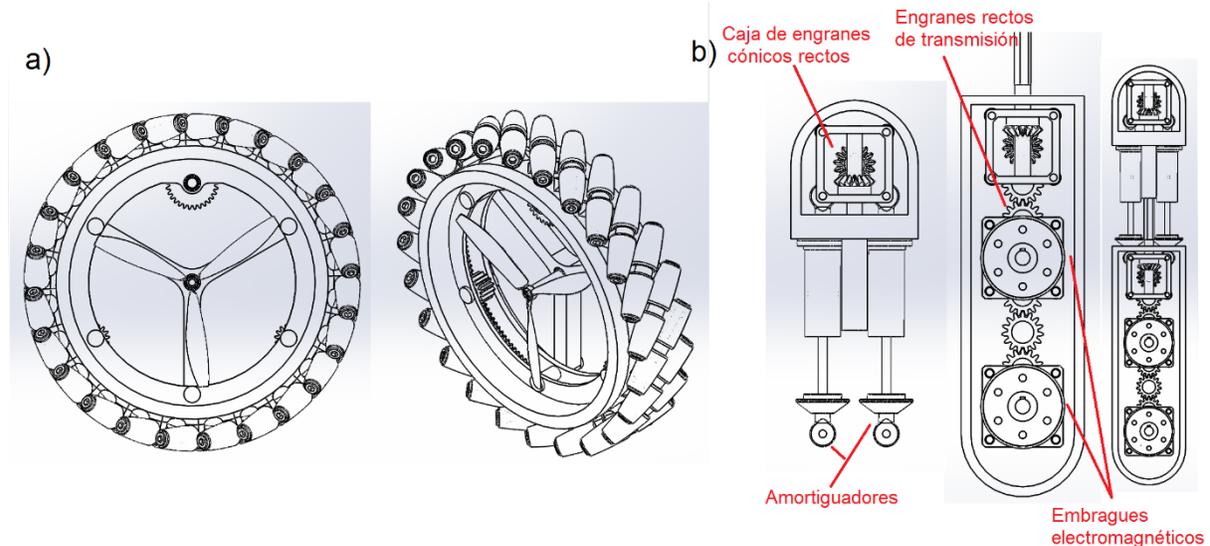


Figura 11. a) prototipo de rueda omnidireccional tipo mecanum conducida por una cremallera circular interior y con una hélice central para el subsistema de locomoción aérea; b) prototipo de subsistema de transmisión, suspensión y acoplamiento de los subsistemas de locomoción terrestre-aéreo.

El acoplamiento de los subsistemas mencionados anteriormente se muestra en la Figura 12a. Para el subsistema de transición entre los modos de locomoción tierra-aire, se emplean dos actuadores lineales, estos actuadores orientan a 90° las tapas donde se encuentran los motores principales. En la Figura 12b, se muestra la operación de este subsistema, el cual opera en conjunto con los embragues electromagnéticos descritos anteriormente para lograr la reconfiguración en el modo de operación del robot, pasando de operar en tierra a aire o viceversa.

Finalmente, acoplando todos los subsistemas mencionados anteriormente, se obtiene el prototipo de robot móvil que se muestra en la Figura 13, en la cual se observan las dos configuraciones de operación (terrestre-aérea). Este prototipo se encuentra actualmente en fase de validación y rediseño mediante análisis de movimiento, las especificaciones físicas se muestran en la Tabla 3.

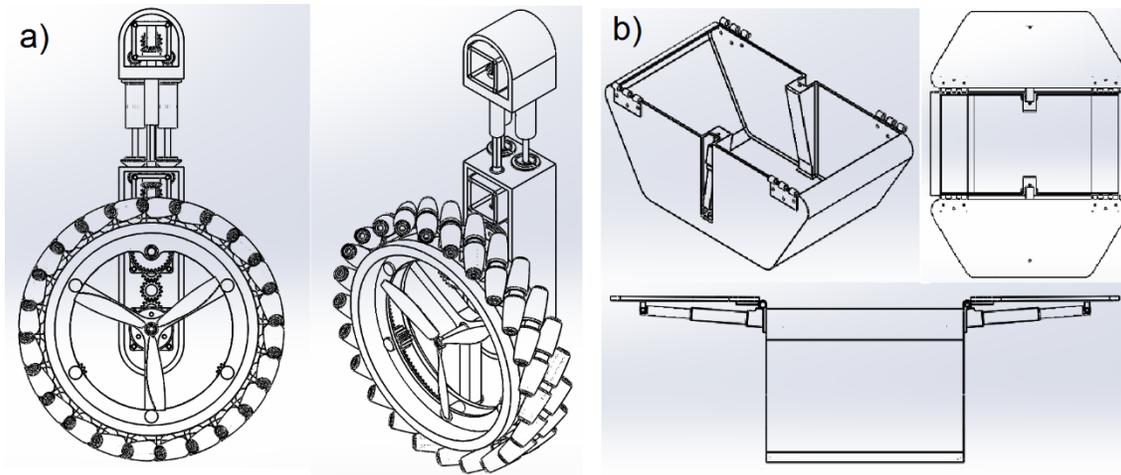


Figura 12. a) ensamble de los subsistemas de locomoción, transmisión, suspensión y acoplamiento de locomoción del robot móvil, b) subsistema de transición para los modos de locomoción terrestre-aéreo.

Tabla 8. Características actuales del prototipo de robot móvil.

Características	Modo terrestre	Modo aéreo
Peso total [Kg.]	6.3	
Altura [cm]	[20.23-37.6]	30.6
Largo [cm]	[56-81.9]	77
Ancho [cm]	50.8	77
Radio de las ruedas [cm]	20.23	-----
Radio de las hélices [cm]	-----	6.3
Materiales	Aluminio, plástico ABS, fibra de carbono, acero.	
Las medidas corresponden a un mínimo y máximo dependiendo de la configuración y posición de los subsistemas, lo que permite variar la altura y el largo en la configuración terrestre, mientras en la configuración aérea se desea que la estructura sea simétrica.		

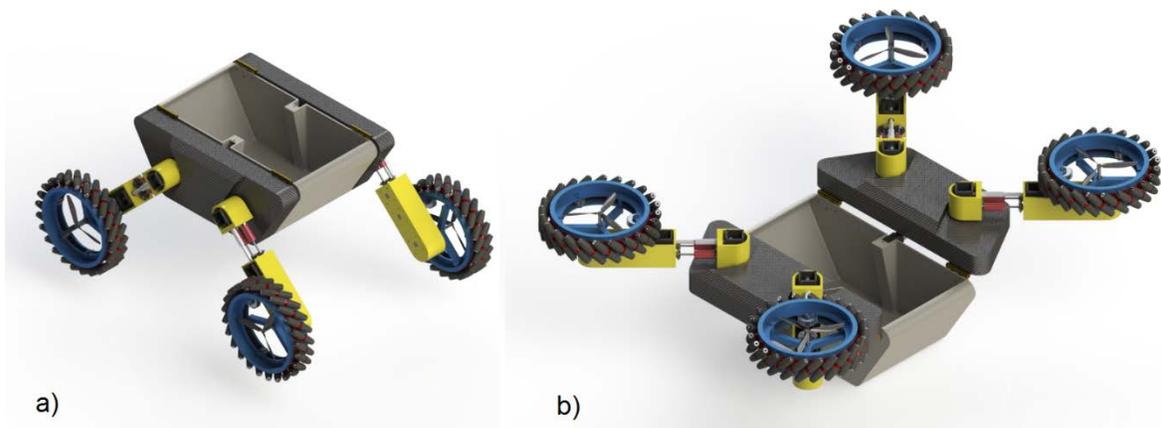


Figura 13. Prototipo de robot móvil multi-terreno, a) modo de operación terrestre, b) modo de operación aérea.



6. Conclusiones y trabajo a futuro

El desarrollo de este trabajo se encuentra aún en etapas de rediseño y análisis de movimiento en los programas computacionales Solidworks y ADAMs/View. Esto con el fin reducir el peso total del sistema y simplificar algunos subsistemas, así como evaluar la continuidad en el diseño de orugas como medio de locomoción o emplear únicamente las ruedas omnidireccionales para la operación en tierra, en el caso de la operación aérea, los análisis pendientes servirán para dimensionar las características de los motores principales y el tamaño de las hélices. También se ha propuesto agregar una hélice de mayor tamaño en el centro del chasis de la estructura con la finalidad de generar el empuje de despegue y de sustentación, dejando a las hélices de las ruedas la tarea de orientación y control de movimiento. Una vez validado el diseño mecánico y análisis de movimiento, el prototipo se planea exportar a un programa de simulación de entornos de desastres, donde se realizarán pruebas normalizadas en cuanto a movilidad [37,38]. Con la elaboración de este prototipo de robot móvil, se espera contar con un prototipo factible de fabricar y que sirva como una herramienta que permita a equipos de rescate urbano abarcar más zonas de búsqueda y tener una mejor capacidad de respuesta en caso de desastres, salvando así a un número mayor de víctimas.

Referencias

- [1] "What is a disaster? – IFRC", Ifrc.org, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.ifrc.org/en/what-we-do/disaster-management/about-disasters/what-is-a-disaster/>. [Accesado el 05 de Septiembre de 2016].
- [2] Murphy R., Tadokoro S., Nardi D., Jacoff A., Fiorini P., Choset H., and Erkmen A., "Search and rescue robotics", *Springer Handbook of Robotics*, B. Siciliano and O. Khatib, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 1151-1173, 2008.
- [3] Murphy R., "Disaster Robotics", *Intelligent robotics and autonomous agents*, The MIT Press, 2014.
- [4] Liu J., Wang Y., Li B. and Ma S., "Current research, key performances and future development of search and rescue robots", *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, Higher Education Press, vol. 2, no. 4, pp. 404-416, 2007.
- [5] Davids A., "Urban Search and Rescue Robots: From tragedy to Technology", *Intelligent systems*, IEEE, vol. 17, no. 2, pp. 81-83, 2002.
- [6] Daler L., "Adaptative Morphology for Multi- Modal Locomotion", Ph.D. dissertation, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Suiza, 2015.
- [7] Ignatova D. and Oransky R., "Mechatronic approach to investigations of rescue operations", 14th International Symposium MECHATRONIKA 2011, pp. 103-108, Trencianske Teplice, 2011.
- [8] Nie C., Pacheco X. and Spenko M., "Robots on the Move: Versatility and Complexity in Mobile Robot Locomotion", *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 20, no. 4, pp. 72-82, 2013.
- [9] Daler, L., Mintchev, S. Stefanini, C. and Floreano, D., "A Bioinspired multi-modal flying and walking robot", *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 10, no. 1, 2015.
- [10] Bruzzone L. and Quaglia G., "Review article: locomotion systems for ground mobile robots in unstructured environments", *Mechanical Sciences*, Copernicus Publications, vol. 3, pp. 49-62, 2012.
- [11] Lim S. and Teo J., "Recent advances on locomotion mechanisms of hybrid mobile robots", *WSEAS Transactions on systems*, vol. 14, pp. 11-25, 2015.
- [12] Xu H., Tan D., Zhang Z. Xue K. and Jin B., "A reconfigurable mobile robot with 5th wheel", *International Conference on Mechatronics and Automation*, ICMA 2009, IEEE, pp. 211-216, Changchun, China, 2009.
- [13] Nie C. Hauschka G. and Spenko M., "Design and experimental characterization of an omnidirectional unmanned ground vehicle for outdoor terrain", *International Conference on Robotics and Automatization*, ICRA 2012, IEEE, pp. 4016-4021, Minnesota, USA, 2012.



- [14] Tabata K., Inaba A. and Amano H., “*Development of a transformational mobile robot to search victims under debris and rubble*”, Workshop in Safety, Security and Rescue Robotics 2005, IEEE, pp. 19-24, Kobe, Japan, 2005.
- [15] Zhang H., Wang W., Deng Z., Zong G. and Zhang J., “*A novel reconfigurable robot for urban search and rescue*”, International Journal of Advanced Robotic Systems, vol. 3, no. 4, pp. 359-366, 2006.
- [16] Zhang H., Wang W., Zhang J. and Zong G., “*A novel modular mobile robot prototype for urban search and rescue*”, Service Robot Applications, InTech, pp. 215-234, 2008.
- [17] Lu D., Dong E., Liu C., Xu M. and Yang J., “*Design and development of a leg-wheel hybrid robot hytroi*”, International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2007, IEEE/RSJ, pp. 6031-6036, Tokio, Japan, 2010.
- [18] Tadakuma K., Tadakuma R., Maruyama A., Rohmer E., Nagatani K., Yoshida K., Ming A., Shimojo M., Higashimori M. and Kaneko M., “*Mechanical design of the Wheel-leg hybrid mobile robot to realize a large Wheel diameter*”, International conference on Intelligent Robot Systems, IROS 2010, pp. 3358-3365, Taipei, Taiwan, 2010.
- [19] Bayar G., Koku A. and Konukseven E., “*ComoRat: A configurable all terrain mobile robot*”, International Conference on Automatic Control, Modelling and Simulation, WEAS Press, vol 11, pp. 507-512, Istanbul, Turkey, 2009.
- [20] Weiyan S., Yang Q. and Zhengshuhua C., “*Structure design and performance analysis for locomotion system of the field exploration robot*”, WSEAS Transactions on Systems, vol. 10, no. 10, pp. 331-341, 2011.
- [21] Aisham B., Bakhsh Q., Hasnan K. and Ahmed A., “*Design and control architecture of a small mobile robot with hybrid locomotion system*”, Applied Mechanics and Materials, pp. 619-622, 2014.
- [22] Hasnan K., Bakhsh Q. and Ahmed A., “*New hybrid locomotion system design*”, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, vol. 8, no. 4, pp. 247-252, 2014.
- [23] Michaud F., Arsenault M., Bergeron Y., Cadrin R., Gagnon F., Legault M., Millette M., Pareé J., Tremblay M., Léetourneau D., Lepage P., Morin Y., Caron S. and Bisson J., “*Co-design of azimuth: A multi-modal robotic platform*”, International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, ASME 2003, vol. 1, pp. 801-810, Illinois, USA, 2003.
- [24] Kosset A. and Papanikolopoulos N., “*A robust miniature robot design for land/air hybrid locomotion*”, International Conference on Robotics and Automation, IEEE, pp. 4595-4600, Shanghai, China, 2011.
- [25] Bachman R., Boria F., Vaidyanathan R., Ifju P. and Quinn R., “*A biologically inspired micro-vehicle capable of aerial and terrestrial locomotion*”, Mechanism and Machine Theory, vol. 44, no.3, pp. 513-526, 2009.
- [26] Latscha S., Kofron M., Stroffolino A., Davis L., Merritt G., Piccoli M. and Yim M., “*Design of a hybrid exploration robot for air and land deployment (H.E.R.A.L.D.) for urban search and rescue applications*”, International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2014, IEEE/RSJ, pp. 1868-1873, Chicago, USA, 2014.
- [27] Peterson K. and Fearing R., “*Experimental dynamics of wing assisted running for a bipedal ornithopter*”, International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2011, IEEE/RSJ, pp. 5080-5086, 2011.
- [28] Briod A., Kornatowsky P., Zufferey J., and Floreano D., “*A collision resilient flying robot*”, Journal of Field Robotics, vol. 31, no. 4, pp. 469-509, 2014.
- [29] Itasse M., Moschetta J., Ameho Y. and Carr R., “*Equilibrium transition study for a hibrid mav*”, International Journal of Micro Air Vehicles, vol. 3. no. 4, pp. 229-246, 2011.
- [30] Kalantari A. and Spenko M., “*Design and experimental validation of hytaq, a hybrid terrestrial and aerial quadrotor*”, International conference on Robotics and Automation, ICRA 2013, IEEE, pp. 4445-4450, 2013.
- [31] Kawasaki K., Zhao M., Okada K. and Inaba M., “*MUWA: Multi-field universal Wheel for air-land vehicle with quad variable pitch propellers*”, International conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2013, IEEE/RSJ, pp. 1880-1885, 2013.
- [32] Alwafi H., Arikani K. and Irfanoglu B., “*Attitude and altitude control of two Wheel trirotor hybrid robot*”, International Journal of Scientific Knowledge, vol. 2, no. 1, pp. 42-56, 2012.



- [33] Kucuk D. *“Design of two wheeled twin rotored hybrid robotic platform”*, Master degree dissertation, The Graduated School of Natural and Applied Sciences, Atilim University, Ankara, Turkey, 2010.
- [34] Woodward M., and Sitti M., *“Multimo-bat: A biologically inspired integrated jumping-gliding robot”*, The International Journal of Robotics Research, vol. 33, no. 12, pp. 1511-1529, 2014.
- [35] Kovac M., Zufferey J. and Floreano D., *“Towards a self-deploying and gliding robot”*, Flying insects and robots, 2009.
- [36] Ransom S., Krömer O. and Lückemeier M., *“Planetary rovers with mecanum wheels”*, 16th International Conference of the International Society for Terrain Vehicle Systems, ISTVS 2008, pp. 25-28, Torino, Italy, 2008.
- [37] Jacoff A., Messina E., Weiss B., Tadokoro S. and Nakagawa Y., *“Test Arenas and Performance Metrics for Urban Search and Rescue Robots”*, International Conference on Intelligent Robots and systems, IEEE/RSJ 2003, pp. 3396-3403, Las Vegas, USA, 2003.
- [38] Messina E. and Jacoff A., *“Measuring the performance of urban search and rescue”*, Conference on Technologies for Homeland Security, IEEE, pp. 28-33, Woburn, MA, 2007.



Diseño Mecatrónico de un Robot Móvil

García Silla Daniel¹, Vargas Soto José Emilio², Díaz Delgado Guillermo²
y González Gutiérrez Arturo²

Universidad Autónoma de Querétaro, ¹Facultad de Informática, ²Facultad de Ingeniería.

Resumen

El desarrollo de un robot móvil requiere la integración de varias disciplinas, entre las que destacan la ingeniería mecánica, la ingeniería electrónica y los sistemas computacionales. Es por ello que se considera un robot móvil como un tipo de máquina mecatrónica. En éste trabajo se abordan los diferentes elementos que se utilizaron en el diseño mecánico de un robot móvil en sus diferentes etapas de desarrollo. De acuerdo a la maduración lograda en el proyecto se realizaron diferentes versiones del robot móvil, las cuales se describen brevemente como parte de un trabajo que permitió lograr una experiencia asociada al desarrollo de éste tipo de máquinas.

Palabras clave: Robot omnidireccional, modelación, sistema mecatrónico.

3. Introducción

En los últimos años los robots móviles se han posicionado en diferentes campos de aplicación, una de las finalidades de éste tipo de máquinas es ayudar en actividades cotidianas; sobre todo en aquellas tareas que requieren algún tipo de asistencia remota. Esta es una de las razones por la cual se han generado grupos de investigadores que actualmente desarrollan proyectos en donde se crean vehículos robóticos capaces de desplazarse de forma omnidireccional [1-5]. En éste sentido, resulta particularmente conveniente lograr una movilidad que permita una amplia variedad de posiciones, lo que posibilita la aplicación de robots móviles en diversas tareas; por ejemplo, en el desarrollo de una silla de ruedas para personas alguna discapacidad de locomoción, en la mayoría de las ocasiones las investigaciones se centran en optimizar y aprovechar los espacios de áreas de trabajo. Sin embargo en la práctica los movimientos pueden ser incómodos o imposibles de realizar con las sillas de ruedas convencionales. Es por esto que se han llegado a realizar algunas sillas de ruedas capaces de realizar movimientos omnidireccionales, permitiendo al usuario una serie de movimientos que antes no creían posibles. En el ámbito industrial basándose en la misma idea de espacios reducidos, podría desarrollarse un montacargas de forma que se utilice un mínimo de espacio para realizar las tareas de maniobra sin problemas. [6-9].

Un robot omnidireccional es un tipo de robot móvil con una configuración que le permite realizar un movimiento libre en cualquier dirección con la posibilidad de alcanzar cualquier punto a pesar de ser una estructura compleja. Mientras los robots móviles comunes se componen de un arreglo de ruedas convencionales, las cuales pueden ser articuladas para establecer un radio de giro, la forma de un robot omnidireccional puede variar usando diferentes tipos de ruedas. Por otra parte, también existen las ruedas omnidireccionales, éste tipo de ruedas tienen una serie de rodillos que permiten no solo un movimiento del robot en el sentido del giro de la rueda, sino además es posible lograr un movimiento perpendicular del robot con respecto al sentido normal de giro de sus ruedas.



Las aplicaciones de robots móviles son muy amplias, algunas de éstas comprenden el uso de robots móviles para entretenimiento de carritos móviles con distintos desempeños, robots exploradores utilizados en arqueología, robots que transportan material peligroso en áreas específicas de algún proceso, entre otras aplicaciones. Una de las soluciones de robótica que permite el diseño de los distintos robots móviles es una estructura modular adecuada y bien adaptada a las condiciones locales que presenta cada aplicación, tomando en cuenta las áreas de alto riesgo en donde se pueda mejorar en la seguridad del personal, así como la eficiencia en el trabajo, la productividad y flexibilidad. En este sentido, los sistemas móviles equipados con manipuladores para detección y localización de minas terrestres son considerados una herramienta muy necesaria en la localización de minas de forma autónoma o semiautónoma, lo que ha permitido desactivar explosivos con ayuda de sistemas robóticos de forma competente, segura y eficaz.

Sin importar el tipo de robot, es importante el desarrollo de la parte formal del robot la cual corresponde al modelado del comportamiento cinemático, el modelado dinámico, el desarrollo del control que implica el diseño y escritura de software [3,4,5]. Esto motiva la investigación y desarrollo, dando como resultado un considerable número de documentos sobre el tema

Una característica especial de un robot omnidireccional es la propiedad de movilidad en cualquier dirección deseada, que nos dice que “la rueda es orientable respecto al robot por medio de una rotación en el eje vertical sobre el plano de la rueda que no pasa por el centro de la rueda”, en pocas palabras se podría decir, que podemos orientar nuestra rueda en cualquier dirección deseada del robot.

En general, se puede analizar el movimiento de los robots móviles a partir de la ubicación de su centro de rotación instantáneo (ICR), como se muestra en la Figura 1. El ICR es un punto en el cual el centro de todos los ejes coincide en un instante dado. Es un punto que permite lograr una referencia para conocer el radio de giro que tiene un robot móvil cuando se les da una dirección específica a las ruedas. Este es parámetro importante en el estudio de un robot omnidireccional porque mientras otros tipos de robots requieren hacer una rotación para cambiar su dirección un robot omnidireccional puede realizar estos movimientos, solo cambiando el sentido de giro de sus ruedas o reacomodando su estructura para avanzar en otra dirección.

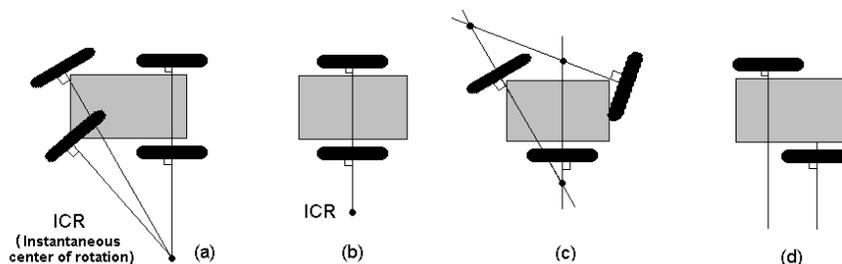


Figura 1. Configuraciones del robot móvil.

Gracias a ésta característica, el espacio de trabajo de un robot omnidireccional es más amplio con respecto a otro tipo de robot móvil, esto debido a que su desplazamiento no se encuentra limitado por el espacio y las maniobras requeridas para lograr una posición deseada, es por ello que un robot omnidireccional se considera una solución ideal para trabajar en zonas de espacios reducidos.

Por otro lado, existen dos aspectos de especial interés en el estudio de los robots móviles, su grado de movilidad y su grado de direccionabilidad; el primero puede ser definido como la libertad que tiene un robot en movimiento, mientras que el grado de direccionabilidad, se refiere a las ruedas direccionables del robot que permiten dirigir al robot, de acuerdo como se muestra en la Figura 2.

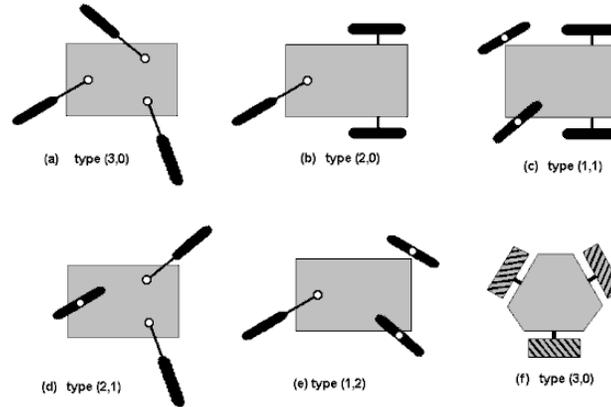


Figura 2. Algunas configuraciones de un robot omnidireccional.

Algunas de las relaciones más comunes entre el grado de movilidad y la direccionalidad del robot se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Algunas combinaciones posibles entre grado de movilidad y de direccionalidad

Grado de movilidad	3	2	2	1	1
Grado de direccionalidad	0	0	1	1	2

En general, un sistema robótico está integrado por diversos elementos, entre los que destacan:

- La mecánica que incluye el modelo y diseño del robot, así como sus componentes.
- La electrónica conformada por un sistema procesador y las etapas de potencia.
- El control que integra la electrónica con los actuadores y los sensores.

En el presente trabajo nos ocuparemos de la parte mecánica, el diseño y sus modelos matemáticos.

4. Robot Móvil

En la construcción y diseño de un robot móvil, al igual que de cualquier máquina, se debe llevar a cabo un análisis de los requerimientos o especificaciones técnicas de acuerdo a sus funciones, movilidad y aplicación. Tomando en cuenta estos aspectos, se pasa a la etapa del diseño de un modelo que ponga en perspectiva que es lo que se desea desarrollar. En este caso, el diseño de nuestro robot se basa en la movilidad en espacios pequeños con la opción de que sea reconfigurable para adaptarse al medio en el que se desarrolla, otras consideraciones como la selección del motor adecuado se podrá deducir a partir de la dinámica del robot, esto para definir el torque que requiere el motor a fin de poder lograr el movimiento de forma correcta.

Existen diversas herramientas computacionales para realizar el diseño del robot, en este proyecto se utilizó el programa: Solidworks, software de diseño CAD en 3D. Algunos de los posibles problemas considerados en el diseño fue la cantidad de peso que podría soportar cada elemento del robot, esto podría provocar que nuestras piezas se deformen más de lo deseado. Para evitar estas situaciones se utilizaron módulos de Solidworks que permiten el análisis de las piezas para evitar o prevenir estos acontecimientos y saber la distribución de esfuerzos y deformaciones en



componentes que se consideren críticos, de acuerdo como se aprecia en la Figura 3. Por otro lado, la herramienta computacional nos permitió desarrollar los planos de fabricación de las piezas del robot, los cuales son necesarios al momento de la fabricación y ensamble de la estructura mecánica del robot.

En la Figura 3 se muestra una imagen utilizada en el análisis de los niveles de esfuerzos en uno de los eslabones de la estructura del robot, se puede apreciar los niveles de esfuerzos a fin de valorar una deformación mínima con el propósito de evitar una fractura en dicha pieza.

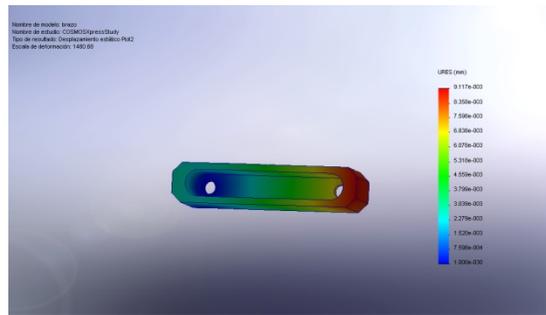


Figura 3. Desplazamiento en deformación con carga de 20 N.

Así como este caso presentado en el análisis de deformación de un eslabón, se efectuaron análisis en otras piezas del robot, las cuales no se presentan por falta de espacio. Dependiendo de la carga aplicada puede o no haber efectos en la pieza analizada, también se puede observar cuanto se deforma en cuestión de desplazamiento en milímetros y si excederá el límite elástico, punto que al sobrepasarlo se puede considerar que el material quedara permanentemente deformado.

En la Figura 4 se muestra el diseño 3D del robot, a partir de este modelo tridimensional se efectuó la construcción mecánica del mismo, usando como material base aluminio, esto por su bajo peso y costo. El modelo realizado fue un primer prototipo, el cual fue extremadamente útil para analizar posibles fallas y complicaciones que se podrían presentar en la construcción.

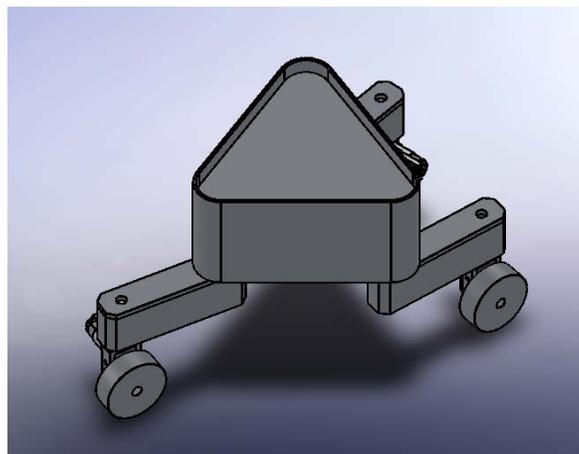


Figura 4. Diseño de un Robot en Solidworks.

5. Aspectos cinemáticos

Uno de los aspectos más importantes que permiten conocer y comprender el movimiento del robot móvil es la generación de los modelos matemáticos a partir de las ecuaciones diferenciales que resultan de los principios físicos asociados al movimiento de cuerpos rígidos, los vectores de posición y los ángulos a los cuales se encuentran los eslabones del robot, para demostrar en cualquier instante la posición $\{C\}$, la velocidad lineal con la que se mueve $\{V_c\}$ y la aceleración del robot en todo momento. En la figura 5 se muestran los parámetros del modelo cinemático en la estructura del robot a seguir a partir de [10], a fin de obtener vectores que definen la cinemática del robot.

Cabe resaltar que en el modelo desarrollado no se considera el deslizamiento entre la rueda y el terreno por donde se desplaza el robot, lo cual permite simplificar el modelo. Algunas de las restricciones en las que se basa el modelo matemático son:

- El robot se mueve sobre una superficie plana.
- No existen elementos flexibles en la estructura del robot (incluidas las ruedas).
- Las ruedas poseen uno o ningún eje de direccionamiento, de manera que este último siempre es perpendicular al suelo.
- No se consideran ningún tipo de fricciones en elementos móviles del vehículo, o contra el suelo.

De acuerdo a la Figura 5, se definieron los siguientes parámetros:

$\{C\}$: Este valor marca el centro de robot, podría utilizarse el centro de gravedad, como punto de guía del vehículo. Donde sus coordenadas serán (x_c, y_c) y su ángulo de orientación θ_c respecto al sistema general o global $\{M\}$.

$\{F_i\}$: Sistema marcado en la unión i -ésima del brazo con el cuerpo del robot. Con un ángulo α_i para representar la orientación relativa respecto a $\{C\}$ y su vector de posición es λ_i . Esto se realiza para denotar la ubicación de cada eslabón.

$\{D_i\}$: Este sistema se encuentra de igual manera en la unión del eslabón i -ésimo y el cuerpo del robot su finalidad es el estudio del cambio del ángulo de dirección, entre el sistema actual y el anterior, β_i , este sistema no tiene vector de posición ya que se encuentra en el mismo punto que $\{F_i\}$.

$\{R_i\}$: Este sistema como se puede ver se encuentra en la unión entre el eslabón i -ésimo y la unión de la rueda i -ésima, su ángulo de dirección respecto a $\{D_i\}$ y su vector de posición son respectivamente γ_i y δ_i .

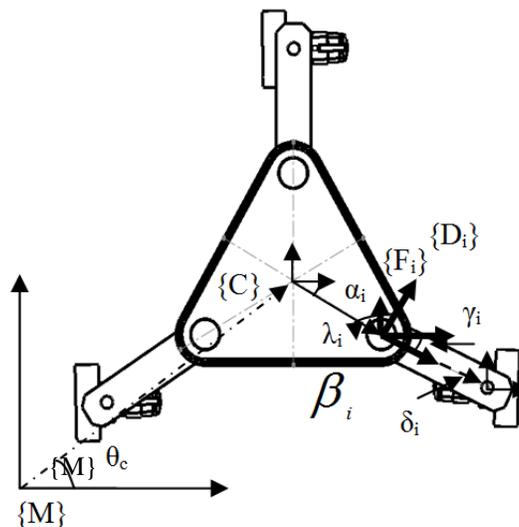


Figura 5. Parámetros del modelo cinemático de robot móvil.



Como se menciono anteriormente, existe un punto de interés en el estudio de robots móviles, el centro de gravedad. Dicho este punto es importante, no solo en la creación de robots si no en la creación de cualquier vehículo, ya que este brinda información sobre estabilidad al robot. En la Figura 6 se muestra el centro de gravedad del robot realizado, mientras más bajo sea o cercano al suelo mayor estabilidad tendrá al robot, si este punto se encontrara en un punto lejano al suelo es más probable que a una alta velocidad o a una fuerza pequeña aplicada contra el robot este se pueda voltear.

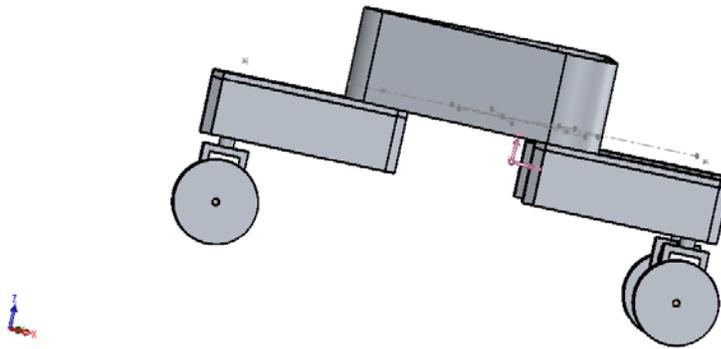


Figura 6. Centro de gravedad de robot móvil.

6. Aspectos dinámicos

Así como se describió la importancia del modelo cinemático, de igual manera se pueden establecer para cada instante las ecuaciones que consideren el efecto de las masas inerciales de los componentes, así como la fricción y los pares de cada motor en cada rueda. El principal objetivo de un estudio dinámico en robots móviles es establecer los torques para mover cada rueda del robot, esto es de suma importancia ya que nos permite determinar la energía necesaria que requiere cada motor para mover adecuadamente al robot móvil. Así mismo, la dinámica nos permite valorar velocidades, aceleraciones, así como efectos inerciales. En la sección anterior se mencionó que en el modelo cinemático no se considera el efecto de deslizamiento, esto es posible si existe una relación adecuada entre el peso del robot y potencia de los motores.

Algunas consideraciones mecánicas que se deben tener en cuenta para un buen diseño de un robot móvil son las siguientes:

- Ubicación del centro de gravedad.
- Masas inerciales de los elementos mecánicos.
- Potencia de los motores.
- Relación de las velocidades.

Todo esto con la finalidad de evitar cualquier posibilidad de tener deslizamiento entre la rueda y el terreno. El deslizamiento se puede considerar a partir del contacto de la rueda con el terreno, en ese momento se presentan diversas fuerzas, una es éstas fuerzas es la fuerza con la que se mueve el robot, otra es la fuerza que se opone al movimiento; es decir, la fuerza de fricción, la cual está compuesta por una fuerza normal al peso del robot y un factor de rugosidad entre el material de la rueda y el material del terreno, de acuerdo como se muestra en la Figura 7.

Mientras exista una adecuada relación entre el peso del robot y la fuerza de fricción, no habrá deslizamiento, pero si se aplicara una aceleración elevada para mover al robot, lo que podría pasar es que la relación peso-fricción cambia a tal grado que la rueda se patinaría sobre el terreno y no se generaría movimiento alguno.

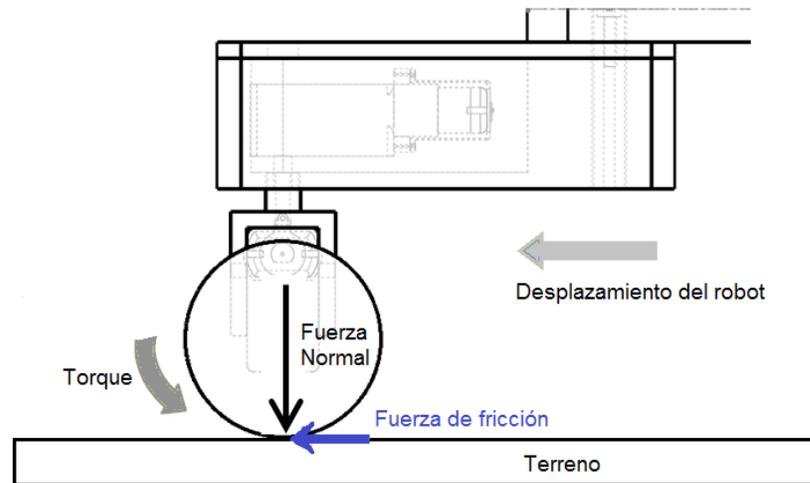


Figura 7. Análisis de las fuerzas en la rueda del robot.

7. Resultados

Derivado del planteamiento presentado en las secciones anteriores, durante varios meses se efectuaron tareas inherentes a la construcción, ensamble, control y pruebas del robot móvil omnidireccional descrito en el presente trabajo. Logrando con ello una experiencia en el conocimiento de éste tipo de máquinas, lo que nos permitió mejorar el diseño original. La Figura 8 muestra el primer prototipo de robot omnidireccional realizado como parte de un proyecto de investigación.



Figura 8. Robot fabricado en aluminio (primera versión).

El análisis del primer prototipo nos permitió mejorar el diseño del robot, principalmente en lo que se refiere a su centro de gravedad, la longitud de los eslabones, la relación peso-fricción y las velocidades de desplazamiento. Dicho análisis está fuera del alcance del presente documento por



falta de espacio. Sin embargo, es importante mencionar que como resultado del trabajo derivado en el primer prototipo se diseñó y construyó una segunda versión, la cual presenta una mayor estabilidad al bajar la plataforma central del robot, en el cual se articulan los eslabones que sostienen las ruedas, de acuerdo como se muestra en la Figura 9.



Figura 9. Robot omnidireccional en su segunda versión.

De igual forma, esta segunda versión nos permitió comprender mejor aspectos asociados a la generación de algoritmos que dotaran de cierta autonomía el desplazamiento que debería de realizar el robot al ir de un lugar a otro. Se reconocieron aspectos de diseño asociados a la integración de la información proveniente de sensores, los cuales nos llevaron a efectuar nuevamente cambios de la ubicación de la plataforma del robot, de acuerdo como se muestra en la Figura 10.



Figura 1. Construcción de robot en su versión final.

8. Conclusiones

En este trabajo se muestran algunos aspectos del diseño de un robot móvil omnidireccional. Se describen los principales criterios de diseño que se tomaron en cuenta, así como aspectos asociados a la cinemática y dinámica de un robot omnidireccional. Con relación los aspecto cinemáticos del robot la modelación planteada nos permitió valorar desde un punto de vista teórico el efecto que presenta la ubicación del centro de gravedad del robot para garantizar su estabilidad,



Con relación al modelo dinámico es relevante mencionar la importancia que presenta la relación peso-fricción, a fin de garantizar un uso eficiente de la energía utilizada para mover al robot. Otro aspecto en el cual se debe tener especial atención cuando el vehículo es de tres apoyos, como es el caso de los robots realizados, es de verificar la altura del centro de masa para evitar volcaduras, pero al mismo tiempo asegurando que sensores capaces de detectar obstáculos puedan ser utilizados de forma adecuadamente en este tipo de robots. Se logró una experiencia en el diseño, construcción y control de éste tipo de máquinas que anteriormente no se tenía.

Referencias

- [1] S.L. Dickerson and B.D. Lapin, 1991, "Control of an Omni-Directional Robotic Vehicle with Mecanum Wheels", National Telesystems Conference Proceeding.1: 323-328.
- [2] M.-J. Jung, H.-S. Kim, S. Kim, and J.-H. Kim, 2000, "Omni-Directional Mobile Base OK-II", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 4: 3449-3454.
- [3] Y. Mori, E. Nakano, T. Takahashi, and K. Takayama, 1999, "Mechanism and Running Modes of New Omni-Directional Vehicle ODV9", JSME International Journal, Series C, 42(1): 210-217.
- [4] K. Watanabe, Y. Shiraishi, S. Tzafestas, J. Tang, and T. Fukuda, 1998, "Feedback Control of an Omnidirectional Autonomous Platform for Mobile Service Robots", Journal of Intelligent and Robotic Systems, 22: 315-330.
- [5] G. Witus, 2000, "Mobility Potential of a Robotic 6-Wheeled Omni-Directional Drive Vehicle (ODV) with Z-Axis and Tire Inflation Control", Proceedings of SPIE, 4024: 106-114.
- [6] M. Asada, H. Kitano (Eds.), RoboCup-98: Robot Soccer World Cup II, Lecture Notes in Computer Science, Springer, New York, 1999.
- [7] R. D'Andrea, T. Kalmár-Nagy, P. Ganguly, M. Babish, The Cornell RoboCup Team, in: G. Kraetzschmar, P. Stone, T. Balch (Eds.), Robot Soccer World Cup IV, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 2019, Springer, Berlin, 2001, pp. 41-51.
- [8] H. Kitano, J. Siekmann, J.G. Garbonell (Eds.), RoboCup-97: Robot Soccer World Cup I, Vol. 139, Lecture Notes in Computer Science #1395, Springer, New York, 1998.
- [9] M. Veloso, E. Pagello, H. Kitano (Eds.), RoboCup-99: Robot Soccer World Cup III, Lecture Notes in Computer Science, #1856 Springer, New York, 2000.
- [10] V. F. Muñoz Martínez, G. Gil-Gómez y A. García Cerezo, "Modelado cinemático y dinámico de un robot móvil omni-direccional", XXIV Jornadas de Automática, León, 10-12 de septiembre de 2003, España.
- [11] Jae Heon Chung, Byung-Ju Yi, Whee Kuk Kim "The dynamic modeling and analysis for an Omni-directional mobile robot with three caster wheels"
- [12] Yong Liu, Xiaofei Wu, J Jim Zhu and Jae Lew, "Omni-Directional Mobile Robot Controller Design by Trajectory Linearization"
- [13] Robert L. Williams II, Brian E. Carter, Paolo Gallina and Giulio Rosati "Dynamic Model with Slip for Wheeled Omni-Directional Robots"
- [13] Brian Carter, Matt Good, Mike Dorohoff, Jae Lew, Robert L. Williams II, Paolo Gallina "Mechanical Design and Modeling of an Omni-directional RoboCup Player"
- [14] John Lovine PIC Robotics, McGraw-Hill
- [15] Jae-Bok Song, Kyung-Seok Byun "Design and Control of an Omnidirectional Mobile Robot with Steerable Omnidirectional Wheels"
- [16] Raul Rojas and Alexander Gloye Forster, "Holonomic Control of a robot with an omnidirectional drive".
- [17] Tae Bum Park, Jae Hoon Lee , Byung-Ju Yi, Whee Kuk Kim, Bum Jae You, Sang-Rok Oh, "Optimal Design and Actuator Sizing of Redundantly Actuated Omnidirectional Mobile Robots"
- [18] Luis Adrian Zuñiga Aviles, Jesus Carlos Pedraza Ortega, Efren Gorrostieta Hurtado(2012) . Experimental Study of the Methodology for the Modelling and Simulation of Mobile Manipulators. Int J Adv Robot Syst, 2012, 9:192. doi: 10.5772/51867.



Desarrollo de un sistema embebido para proyectos mecatrónicos basados en motores brushless

Hernández Barrón Lorena Anaid¹, Vargas Soto José Emilio, Ramos Arreguín Juan Manuel, Pedraza Ortega Jesús Carlos.

Universidad Autónoma de Querétaro
loana.heba@hotmail.com¹

Resumen

El interés por la implementación de sistemas que ayuden a la realización de tareas complejas, repetitivas o peligrosas ha desembocado en grandes avances tecnológicos a lo largo de la historia, que van desde compuertas mecánicas a cámaras secretas en antiguas pirámides, hasta los sistemas de guía en las naves de misiones espaciales. Estos tienen un principio de funcionamiento en común: un conjunto de elementos y características que les permiten una operación local o embebida. En la actualidad la tecnología se enfoca en el desarrollo de hardware y software que en conjunto puedan desempeñar tareas de control en tiempo real. En este trabajo se presenta el diseño y desarrollo de un sistema embebido pequeño y de bajo consumo, para proyectos mecatrónicos, orientado al monitoreo y control remoto de motores tipo brushless mediante el uso de una plataforma Intel® y tecnología Open Hardware.

Palabras clave: Brushless, Intel®, Open Hardware, Sistema Embebido.

1. Introducción

El desarrollo de elementos y componentes utilizados para realizar acciones locales de control ha sido un tema de estudio desde tiempos remotos. Por ejemplo, En la antigua Etiopía, 1500 a. C., Amenhotep, desarrolló una estatua del rey de Etiopía llamado: Memon, dicha estatua mediante sistemas mecánicos podía controlar la emisión de sonidos cuando era iluminada por los rayos del sol al amanecer [1]. Durante el transcurso de la historia han acontecido hechos y situaciones que han favorecido el desarrollo de las tecnologías actuales que requieren una determinada acción local.

En este sentido, las tecnologías actuales se orientan en desarrollar sistemas embebidos capaces de realizar operaciones de control en tiempo real. En este trabajo se concibe un sistema embebido como la unión de software y hardware especializado capaz de procesar información proveniente de uno o más sensores con el propósito de realizar acciones correctivas de forma local.

Uno de los primeros sistemas embebidos fue el computador utilizado para el sistema de guía del Apolo, el cual fue desarrollado por el Laboratorio de Desarrollo del MIT a principios de los años 60s [2]. Desde entonces, diversas aplicaciones en la industria aeronáutica han contribuido en mejorar aspectos como eficiencia y seguridad, entre otros. A finales del siglo pasado se desarrolló un sistema embebido basado en microcontrolador 80C51, el cual permitía controlar las acciones de un radar [3].

Sin duda, investigaciones en nuevos materiales y las innovaciones en las tecnologías de los semiconductores seguirán contribuyendo de forma notable en el desarrollo de los sistemas embebidos, tal como ocurrió en el siglo pasado, cuando se lograron capacidades de memoria flash EEPROM con 32 bits y memoria no volátil [4], [5] y [6].



Dado el carácter específico de diseño que tienen los sistemas embebidos, existe una amplia gama de aplicaciones en prácticamente cualquier sector. Los podemos encontrar como elementos de control en instrumentos o aparatos médicos [7], [8], [9] y [10], en sistemas industriales que permiten gestionar mejor los recursos y generar ahorros [11], [12], [13] y [14]. Así como en sistemas inteligentes y de reconocimiento de huellas digitales [15] y [16], entre otros.

Diversas tarjetas y sistemas embebidos se han desarrollado para controlar motores eléctricos [17], [18] y [19]. En este trabajo se presenta el diseño y desarrollo de un sistema embebido orientado al control de un motor de tipo brushless.

2. Desarrollo del proyecto

El desarrollo del proyecto consistió en tres etapas principales: diseño, implementación y pruebas, respectivamente. Cada una de estas etapas está conformada por bloques elementales como se muestra en la Figura 56:

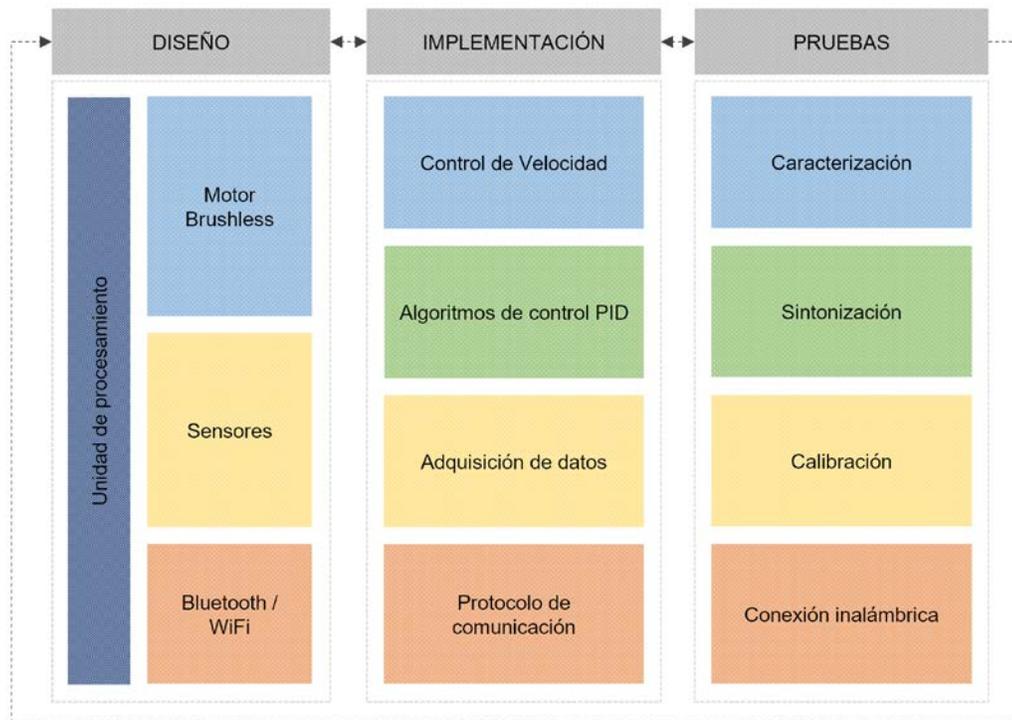


Figura 56. Metodología utilizada para el desarrollo del proyecto

La metodología propuesta describe la composición de un sistema embebido: una unidad de procesamiento, sensores y actuadores. Adicionalmente para este proyecto se incorpora una vía de comunicación inalámbrica. De manera sencilla la metodología ilustra interacción que existe entre las etapas de diseño, implementación y pruebas, así como la relación vertical entre los bloques que conforman cada etapa. A continuación, se describe la metodología utilizada.

2.1 Etapa de diseño

Consiste en la selección de componentes que integrarán el sistema. Ésta etapa está conformada por cuatro bloques elementales que se describen a continuación.



2.1.1 Unidad de Procesamiento

La unidad de procesamiento se encarga de coordinar y mantener comunicación con los demás bloques que conforman el sistema, estableciendo enlaces a través de los distintos protocolos o técnicas de con las cuales se enviarán las señales de potencia a los motores para las variaciones de velocidad a través los Controladores Electrónicos de Velocidad (o ESC, por sus siglas en inglés), se adquirirán los datos de las mediciones de los sensores y el establecimiento de una comunicación inalámbrica y el envío y recepción de datos desde o hacia un dispositivo externo al sistema.

Se seleccionó una plataforma computacional para proyectos embebidos que presenta características suficientes para el control e interconectividad de los dispositivos que conforman el sistema. Intel® Edison (Figura 57), es una plataforma de hardware pequeña, potente y adaptable basada en la arquitectura x86, cuyas características principales se resumen en la

Tabla 9.



Figura 57. Intel® Edison

Tabla 9 Características de la plataforma Intel® Edison

Característica	Descripción
Precio	\$49.95 USD
Flash	4GB, interface SDIO.
RAM	1GB
Procesador	Procesador Atom Dual-core. 100MHz Quark MCU
GPIO	70 pines
Wi-Fi	802.11 (a/b/g/n)
Bluetooth	Bluetooth 2.1/4.0
USB	1 USB-OTG
Otras interfaces	SPI, UART, I2C, PWM
Consumo	3.3V - 4.5V @ <1W
Dimensiones	60mm x 29mm x 8mm
Peso	23g
Programación	C, C++, Python, Node.js

Una ventaja que esta plataforma provee es la opción de incorporar placas de expansión para facilitar el diseño del proyecto total y aportar flexibilidad. Además, para



el desarrollo de aplicaciones, la plataforma puede programarse desde distintos entornos de desarrollo integrado (IDEs), como Arduino y Eclipse, entre otros [20].

2.1.2 Motor Brushless

Los motores BLDC (Brushless Direct Current) son ampliamente utilizados en aplicaciones en sector automotriz, aeroespacial, medico, de consumo e incluso en aplicaciones industriales y de instrumentación. Como su nombre lo indica, estos motores son eléctricamente conmutados por interruptores en lugar de las escobillas. Los motores sin escobillas son síncronos, lo que significa que el campo magnético generado por el estator y el campo magnético generado por el rotor, suceden a la misma frecuencia. Estos motores pueden encontrarse en diferentes configuraciones, para este proyecto se utilizó un motor trifásico AX-4008D que se muestra a continuación en la Figura 58.



Figura 58. Motor BLDC AX4008D 620KV

Para facilitar el control de estos motores y aminorar la carga de procesamiento de la unidad de control, se utilizó un controlador de velocidad, el cual se describe a continuación.

2.1.3 Control Electrónico de Velocidad (ESC)

Un ESC (Figura 4) es un dispositivo electrónico que sirve para controlar la velocidad de un motor brushless. Este dispositivo recibe una señal de control desde la unidad de procesamiento y dependiendo de ésta, el controlador entregará la corriente y el voltaje necesarios al motor para obtener la velocidad angular o la fuerza de empuje deseadas.



Figura 59. Control Electrónico de Velocidad Mystery de 30^a

Con ayuda de un ESC, el control de un motor brushless desde la unidad de procesamiento se vuelve una tarea relativamente sencilla. Más adelante en la sección de resultados, en la Figura 66 se muestra la gráfica de comportamiento de las revoluciones por minuto o RPMs promedio alcanzadas por



el modelo AX-4008D en función del porcentaje de ancho de pulso entregado al ESC desde la unidad de procesamiento.

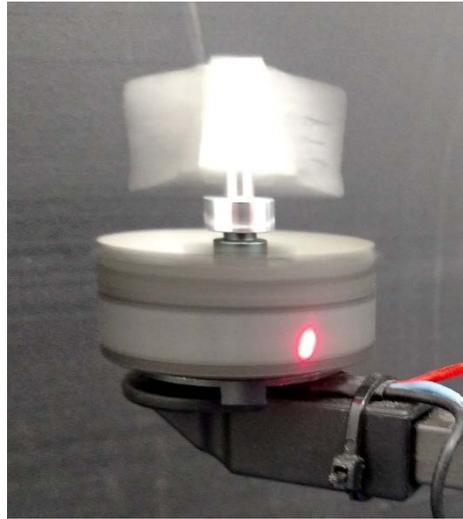


Figura 60. Medición de la velocidad angular de un motor AX-4008D con un tacómetro digital.

Para un mejor desempeño, se maquilaron montajes de sujeción especialmente diseñados para el modelo AX-4008D que, a diferencia de otros modelos de motores, estos cuentan con tres puntos de apoyo en su base, que permitieran un ensamble adecuado del motor previniendo la generación de vibraciones y ruido en las mediciones. Estos montajes se maquilaron con ayuda de una impresora 3D y software CAD (Computer Asisted Design), el resultado final se muestra a continuación en la Figura 61.

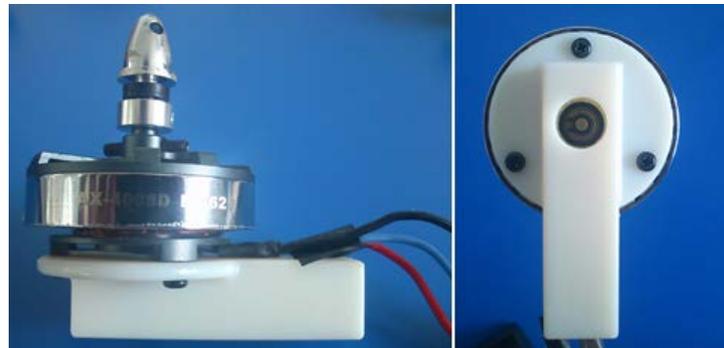


Figura 61. Montajes para motor brushless AX-4008D maquilaros con ayuda de software CAD e Impresión 3D.

A pesar de contar con montajes especialmente diseñados, el impacto de señales externas al sistema, también llamadas perturbaciones, pueden producir un comportamiento diferente al esperado, provocando una variación no deseada en la velocidad angular. Es por ello que se agregaron al sistema, un conjunto de sensores que además de monitorear el comportamiento de los motores, pudieran proveer a la unidad de procesamiento de información valiosa del entorno del sistema, si así es requerido.

Existen varias técnicas para medir la velocidad angular de un motor acorde a las necesidades del proyecto, que van desde la medición de la Fuerza Contraelectromotriz (o Back EMF por sus siglas en inglés) hasta la implementación de encoders y sensores Hall [21]. En la siguiente sección se describen los sensores implementados en este trabajo.



2.1.4 Sensores

Una parte importante en un sistema embebido es la integración de dispositivos que provean información del comportamiento o estado actual del sistema. Para este proyecto se incorporan cuatro diferentes sensores que proveen de datos al sistema para ser procesados.

En primer lugar, se implementó un circuito sencillo que permite medir la velocidad angular del motor de manera similar a como lo hace un encoder, otorgando una retroalimentación al sistema embebido y así la posibilidad de controlar su comportamiento. El circuito implementado consta de un sensor CNY70 y un arreglo de resistencias para adecuar la sensibilidad del circuito, además de un transistor 2N2222 a modo de switch que responderá a la señal de salida del sensor, para ser leída en el pin seleccionado de la unidad de procesamiento que requiere del uso de un Pull Down, que se encargará de reestablecer la señal a un nivel bajo o apagado para que la unidad de procesamiento pueda procesarla en un contador de flancos para determinar la velocidad angular del motor monitoreado. El circuito completo se muestra a continuación:

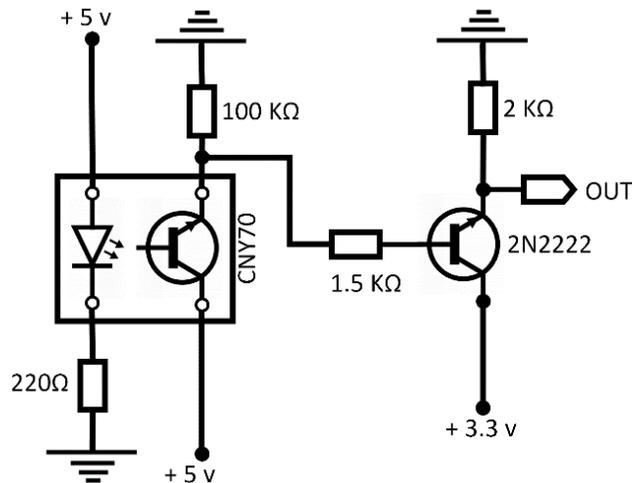


Figura 62. Circuito implementado para la medición de velocidad angular de un motor brushless.

La implementación de este circuito requiere de la colocación de marcas binarias en el motor, las cuales son detectadas por el sensor para el conteo de flancos y la determinación de la velocidad angular con una resolución óptima experimental de seis flancos por revolución. Este proceso se muestra en la Figura 63, donde se puede apreciar el barrido que dejan las marcas binarias por efecto de la velocidad de giro del motor.

Este circuito permite tener una retroalimentación del comportamiento de los actuadores y la posibilidad de implementar una técnica de control para el sistema. Al contar con la información proporcionada por el circuito mostrado en la Figura 62, se recurrió a una estrategia de control de lazo cerrado.

Más de la mitad de los controladores industriales que se usan en la actualidad, se basan en el esquema de control Proporcional, Integral y Derivativo [22]. La función primordial de un controlador es ejecutar un algoritmo basado en los datos de entrada, el valor deseado y el valor real, con el objetivo de aproximar el valor sentido lo más posible al valor deseado [23], es decir, se reduzca el error entre el valor real y el *setpoint*, realizando las correcciones necesarias en futuras iteraciones.



Figura 63. Medición de la velocidad angular del motor AX-4008D utilizando un sensor CNY70 y marcadores monocromáticos.

Como su nombre lo sugiere, estos controladores constan de tres tipos: el proporcional (P), el integral (I) y el derivativo (D). Acorde a las necesidades de la implementación se pueden tener controles de tipo P, PI, PID. En este trabajo se implementó un controlador de tipo proporcional para disminuir el impacto de una posible perturbación en la velocidad angular deseada. La siguiente ecuación define el controlador implementado, que consiste en ajustar el valor de la salida en proporción al valor de entrada o velocidad deseada:

$$Y(t) = K_p * e(t) \quad (1)$$

Donde Y(t) es la salida o RPMs, Kp la ganancia del controlador y e(t) el error en función del tiempo.

Como se mencionó con anterioridad, una de las ventajas del sistema es la posibilidad de incorporación de placas o bloques de expansión. En este proyecto se acopló un módulo integrado por tres sensores: un acelerómetro, un giroscopio y un magnetómetro de tres ejes cada uno. De los cuales se pueden adquirir y procesar los datos de velocidad angular, aceleración lineal y orientación magnética a través de una conexión mediante el protocolo I²C (Inter-Interconnected Circuit) con la unidad de procesamiento.

2.1.1 Comunicación Inalámbrica

Aprovechando las características de la unidad de procesamiento, se utilizó la tecnología Bluetooth incorporada como medio de comunicación inalámbrico, que permite el intercambio de información entre el sistema y un dispositivo externo como un teléfono celular. A través de este medio, y desde una aplicación disponible en el Play Store de manera gratuita como lo es "*Bluetooth spp tools pro*", instalada en un dispositivo móvil, se puede realizar el envío de valores numéricos hacia el sistema que indican la velocidad a la cual debe girar el motor, así como recibir en el mismo los valores de los sensores incorporados.

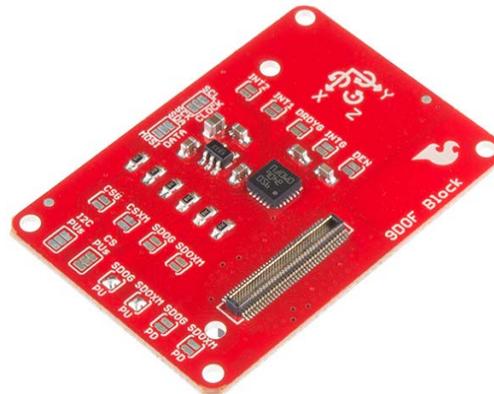


Figura 64 9DOF Block Sparkfun for Intel® Edison.

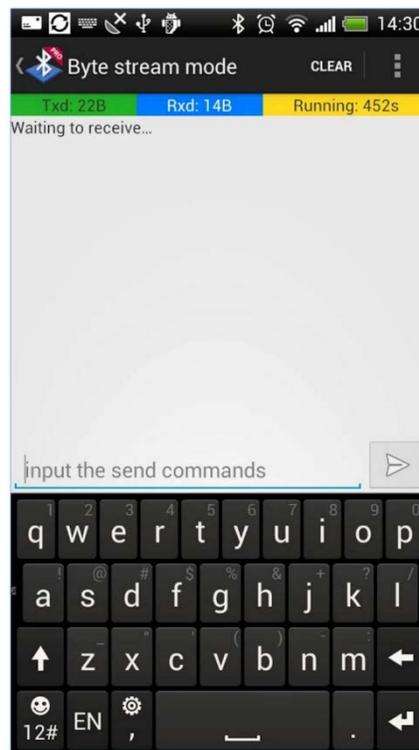


Figura 65 Bluetooth spp tools pro, disponible de manera gratuita en Play Store.

3. Resultados

Se construyó un sistema embebido pequeño y de bajo consumo, tipo torre, enfocado al control y monitoreo remoto de motores tipo brushless haciendo uso de tecnología Open Hardware en base a una plataforma Intel®. El sistema tiene la capacidad de controlar y monitorear de manera inalámbrica hasta cuatro motores tipo brushless a través de la conexión bluetooth con un dispositivo móvil, así como de adquirir y procesar los datos obtenidos de los sensores incorporados. El desarrollo incorpora la implementación de un controlador proporcional de lazo cerrado que disminuye el error en el valor real de la velocidad.



Derivado de la caracterización del modelo de motor utilizado para este proyecto, se obtuvo la gráfica mostrada en la Figura 66, que representa los datos obtenidos como resultado estadístico del total de 2400 mediciones realizadas a cuatro motores modelo AX-4008D. Cada punto de la gráfica representa el valor medio de 120 datos experimentales. Se aprecia un comportamiento no lineal que tiende a un valor asintótico de aproximadamente 7000 RPM. La gráfica muestra un cambio en la velocidad del motor a partir de un porcentaje de ancho de pulso mayor al 5%, esto debido a las características electromecánicas de este modelo. En la Figura 5 se muestra el experimento realizado en la medición de velocidad angular de cada motor, utilizando un tacómetro digital que emite un rayo láser apuntando a una estampilla reflectora colocada en el rotor. Como se aprecia en la Figura 66 la velocidad del motor varía en función del porcentaje del ancho de pulso entregado al controlador de velocidad.

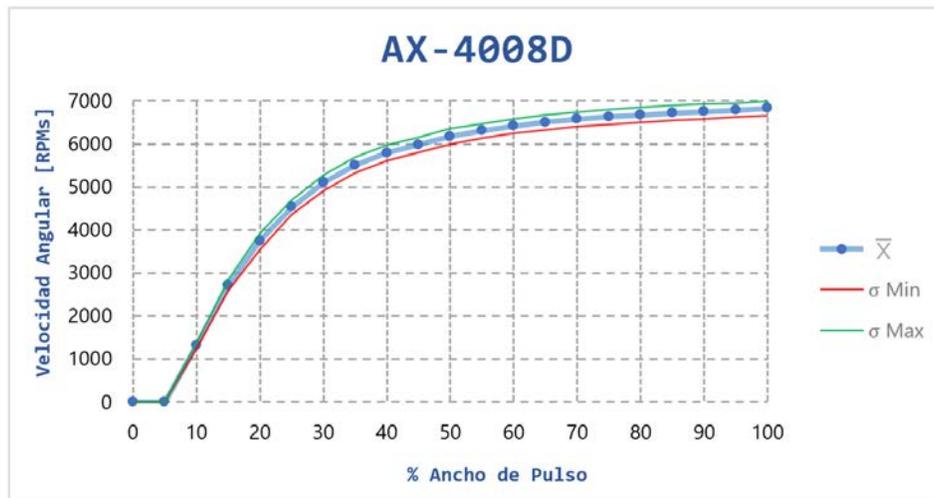


Figura 66 Gráfica de velocidad angular obtenida.

4. Conclusiones

El desarrollo de sistema embebido desarrollado en el presente trabajo pretende ser un punto de partida para la fácil implementación de proyectos mecatrónicos que requieran la utilización de motores de alto rendimiento y poco mantenimiento así como monitoreo y acción local, que provean de un entorno fácilmente reprogramable, configurables y de bajo consumo en áreas como la domótica, aeronáutica, entre muchas otras.

Referencias

- [1] Dormido S. "Control Automático: Evolución Histórica". Curso de Verano de Control de Procesos: de la Teoría a la práctica. Departamento de Informática y Automática. UNED, Julio, 1995.
- [2] Labre S., Suárez C. E.J., "Control de motores sin escobillas (BLDC) y sin sensores usando el microcontrolador ARM Cortex3 con 32 bits de Lpcpresso", Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería y Computación. Tesis, Ecuador 2012.
- [3] Binney R., Riblett L., "Using Embedded Microcontrollers in Radar Test Equipment" ARFTG Conference Digest-Spring, 35th, Dallas, TX, USA, 1990, pp. 37-46.
- [4] Kuo C., et al., "A 32 bit microcontroller with an embedded flash EEPROM" VLSI Technology, Systems, and Applications, 1991. Proceedings of Technical Papers, 1991 International Symposium on, Taipei, 1991, pp. 94-98.
- [5] Kuo C., et al., "A microcontroller with 100 K bytes embedded flash EEPROM" Solid-State and Integrated Circuit Technology, 1995 4th International Conference on, Beijing, 1995, pp. 138-140.
- [6] Fukushima T., et al., "A microcontroller embedded with 4 Kbit ferroelectric non-volatile memory" VLSI Circuits, 1996. Digest of Technical Papers. 1996 Symposium on, Honolulu, HI, USA, 1996, pp. 46-47.



- [7] Hitzelberger C., Manoli Y., Hakenes R., and Gross S., "A microcontroller embedded ASIC for an implantable electro-neural stimulator" Solid-State Circuits Conference, 2001. ESSCIRC 2001. Proceedings of the 27th European, Villach, Austria, 2001, pp. 413-416.
- [8] Jin-Seung K., Rahman M., Jang B., Kim K. and Kim B., "DSP embeded hardware for non-contact bio-radar heart and respiration rate monitoring system" 2009 International Conference on Future BioMedical Information Engineering (FBIE), Sanya, 2009, pp. 560-563.
- [9] Aishwarya V., Bai V., "Design and development of an embedded system for measuring hardness of foot in diabetic patients" Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology (STUDENT), 2010 IEEE Conference on, Petaling Jaya, 2010, pp. 81-85.
- [10] Sutar R., Kothari A., Keskar A., "Development of an embedded system for real time Heart Rate Variability analysis" Communications and Information Technologies (ISCIT), 2013 13th International Symposium on, Surat Thani, 2013, pp. 288-292.
- [11] De la Fuente M., Echanobe J., Campo I., Susperregui L., Mautua I., "Development of an embedded system for visual servoing in an industrial scenario" International Symposium on Industrial Embedded System (SIES), Trento, 2010, pp. 192-196.
- [12] Yan X., Zhou L., Qu W., Kang W., "The research and development of data acquisition card for on-line monitoring system of power quality based on Windows CE" 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Cambridge, 2008, pp. 1986-1990.
- [13] Reddy A., Kanchi R., "Design and development of an embedded system for thermal conductivity measurement of polymer thin films" Mechanical and Electronics Engineering (ICMEE), 2010 2nd International Conference on, Kyoto, 2010, pp. V1-454-V1-459.
- [14] Chayalakshmi C., Jangamshetti D., Sonoli S., "Design and development of an ARM platform based embedded system for measurement of boiler efficiency" Industrial Electronics and Applications (ISIEA), 2013 IEEE Symposium on, Kuching, 2013, pp. 39-43.
- [15] Herburger G., Fickenscher M., Leibl P., Sedlmeier P., "Development of a low-cost embedded system for an optical-forensic device" Multimedia & Expo Workshops (ICMEW), 2015 IEEE International Conference on, Turin, 2015, pp. 1-5.
- [16] Acevedo D., Duarte J., "Development of an embedded system for classification of EMG signals" Engineering Mechatronics and Automation (CIIMA), 2014 III International Congress of, Cartagena, 2014, pp. 1-5.
- [17] Sathyan A., Krishnamurthy M., Milivojevic N., Emadi A., "A low-cost digital control scheme for Brushless DC motor drives in domestic applications" Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. IEEE International, Miami, Florida, USA. Page(s): 76 – 82, E-ISBN 978-1-4244-4252-2, Print ISBN: 978-1-4244-4251-5, DOI: 10.1109/IEMDC.2009.5075186
- [18] Kang Y., Lee S., and Yoo J., "A microcontroller embedded AD converter based low cost sensorless technique for brushless DC motor drives" Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005. 2005, pp. 2176-2181 Vol. 3.
- [19] O'Sullivan, D., Sorensen, J., & Murray, A. "Model-Based Design Streamlines Embedded Motor Control System Development", 2015 Analog Divices Inc., TA13139-0-4/15.
- [20] Intel® Edison. *Intel® Edison Development Platform*. Pag 1. Recuperado de http://download.intel.com/support/edison/sb/edison_pb_331179002.pdf
- [21] Yedamale, P. (2003). *Brushless DC (BLDC) motor fundamentals*. Microchip Technology Inc, 20, 3-15.
- [22] Katsuhiko, O. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Minnesota, PEARSON EDUCACION, 5ta edición.
- [23] Willis M. (1999) *PID Control Theory Tutorial*. Dept. of Chemical and Process Engineering University of Newcastle.



Propuesta didáctica para el desarrollo de interfaz gráfica hombre-máquina usando RAD para RaspBerry Pi

Chenoweth Chenoweth Ivan Rogelio¹, Abril García José Humberto¹, Montijo Haro Fausto¹, Iván Dostoyewski Meza Ibarra¹, Alejandro García Juárez².

Universidad Tecnológica de Hermosillo, Blvd. de Los Seris final sur s/n.¹
Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Col. Centro²
Hermosillo, Sonora, México

Resumen

La presente propuesta exhibe el procedimiento para la elaboración de una interfaz gráfica hombre-máquina (HMI) human machine interface por sus siglas en inglés, para ejecutarse dentro de la tarjeta electrónica RaspBerry pi. Se muestra una mejora en el tiempo del desarrollo de HMI, usando un lenguaje en un sistema operativo de código abierto tal como Linux y Python respectivamente, y nos ofrece la oportunidad de aprender de las tecnologías RAD. Esto facilita su implementación industrial en sistemas SCADA o en "IoT" (Internet of Things) como propuesta de iniciación en proyectos de mayor complejidad en la industria mecatrónica, además ofrece un menor tiempo en cuanto al entrenamiento de las tecnologías involucradas beneficiando con esta propuesta didáctica al alumno desarrollador de estas interfaces gráficas.

Palabras clave: HMI, RaspBerry, Rasbian, Python, Linux, código abierto, IoT, SCADA.

1. Introducción

Una Interfaz Gráfica en el cual una persona interactúa con un equipo mecatrónico se conoce como una interface Hombre-Máquina, la cual se puede definir como la parte de un sistema con la que el usuario puede interactuar con uno o varios equipos mecatrónicos en tiempo real, o de forma programada. Estas interfaces gráficas pueden ser desde interruptores, medidores, luces indicadoras hasta un sofisticado tablero a la medida con componentes gráficos para sensores o actuadores especializados. Las HMI pueden ser usadas para monitoreo, control, o para almacenar datos históricos que representan los eventos que suceden con la máquina dependiendo de la actividad para la cual el sistema fue diseñando. En la elaboración de una HMI es muy común utilizar una o varias tecnologías como plataformas de desarrollo, debido a la complejidad de las tareas que realiza y muchas veces tanto el hardware como el software son desarrollados a la medida.

"IoT" [1] o por sus siglas en ingles "Internet of Things" es un concepto actual muy conocido que se refiere a la interconexión "digital" de objetos cotidianos con internet, donde se conectan al internet más "cosas u objetos" que personas. Podemos también escuchar el término como "el internet de todas las cosas" o "internet en las cosas" el cual es uno de los temas de vanguardia y están presentes en "sistemas embebidos".

Un sistema embebido es considerado un sistema electrónico que ha sido diseñado para realizar pocas funciones en tiempo real, dependiendo del caso. Opuestamente de lo que ocurre con las computadoras con un uso más extendido, las cuales tienen un propósito general, ya que están diseñadas para cubrir un amplio rango de necesidades a diferencia de los sistemas embebidos se diseñan para cubrir necesidades específicas. Los sistemas embebidos o empotrados los



encontramos en: celulares, televisiones, proyectores, vehículos, horno de microondas, elevadores, routers, switches, impresoras, consolas de juegos, de audio, video, en la industria en los sistemas de tipo SCADA [2] y muchos otros aparatos y equipos, los cuales normalmente no poseen una pantalla, o en su defecto una interface con el usuario muy amigable visualmente, muy similar a las aplicaciones móviles o de escritorio que son muy populares hoy en día.

Un sistema embebido que forma parte de "IoT" o SCADA, el cual trabaja de forma autónoma, o puede ser gestionado por otros equipo de maquina a máquina (M2M) [3] con conexión a internet o de humano a máquina (H2M). El crecimiento del mercado de Sistemas Embebidos será mucho mayor que el mercado de computadoras personales y teléfonos móviles en los siguientes años.

Una de las funcionalidades más solicitadas en la programación de software para las HMI es encontrar tecnologías adecuadas que permitan crear fácilmente ventanas de interfaz gráfica de usuario, que contengan una selección de elementos visuales como imágenes, formas, botones, que se puedan elaborar de manera rápida, flexible, que faciliten la tarea de diseño y contenga componentes para representar dispositivos reales de uso en la industria mecatrónica como: motores, tanques, indicadores, interruptores entre otros.

2. Desarrollo

En esta propuesta didáctica pretende mostrar una guía para incursionar en el aprendizaje y en el ciclo del desarrollo de software para HMI de sistemas embebidos que están basados en Linux, debido a su bajo costo al ser de código abierto (GNU) [4], la cual es una licencia de software, que garantiza a los usuarios finales (personas, compañías u organizaciones) la libertad de usar, estudiar, compartir (copiar) y modificar el software, ideal para la enseñanza y el aprendizaje.

Las tecnologías seleccionadas para el desarrollo de este proyecto son Linux/Raspbian [5], Python [6] y PAGE [7] las cuales fueron las elegidas en la presente metodología por su facil integracion.

Para poder trabajar con Raspbian Pi se debe instalar y configurar un sistema operativo, por lo que es necesario hacer uso de NOOBS, el cual, es un instalador muy sencillo de Raspbian, los pasos de insalacion se pueden encontrar en el sitio oficial de Raspbian.

Una de las herramientas relevantes usadas en esta propuesta que mejoró el tiempo de desarrollo del HMI fue PAGE, que es, esencialmente un herramienta de diseño de interfaces gráficas de usuario de tipo (*drag and drop*) arrastrar y soltar, conocidas como RAD, la cual, no es un herramienta que genera todo el código HMI, más bien intenta aliviar la carga sobre el programador de Python en el diseño gráfico, para poder visualizar la interface antes de operar funcionalmente. Está dirigido al desarrollador de Python con el fin de obtener el código "esqueleto" de una interfaz gráfica y visualizarse fácilmente, y posteriormente agregar las funcionalidades de comunicación, eventos o lo que se requiera.

Las herramientas RAD como PAGE son parte del desarrollo de software de "métodos rápidos" los cuales reducen el tiempo del ciclo de vida del software, al obtener el código de una versión prototipo y después integrar las funcionalidades de manera paulatina e iterativa para satisfacer los requerimientos del cliente y controlar el ciclo de desarrollo de software.

Los métodos rápidos se elaboraron por la inestabilidad y complejidad del entorno técnico y el hecho de que el cliente comúnmente tiene problemas para definir cada uno de los requisitos al inicio del proyecto. El término "RAD", es una referencia a la capacidad de adaptarse a los cambios de contexto, adaptaciones y de especificaciones que suceden durante todo el proceso de desarrollo de una aplicación. Es por esa razón que, en el año 2001, 17 personas redactaron el manifiesto ágil [8], el cual nos dice entre otras cosas que valora "Software funcionando sobre documentación extensiva".



Aunque PAGE genera el código del diseño, no es suficiente para una aplicación completa a la medida. El código generado está dirigido a la construcción de una sola clase [9] de interfaz gráfica de usuario y el código de arranque en Python necesario para conseguir visualizarla inicialmente en la pantalla.

El desarrollo de la interfaz gráfica se describe con el siguiente uso de hardware y software, quedando estructurada de la siguiente manera:

1.1 Herramientas de software

- Raspbian-NOOBS (Raspberry Pi Linux installer) [10]
- Python (Version 2.7.10)
- *Tkinter* (GUI Python module)
- Tcl/tk 8.4.6 (toolkit graphic library) [11]
- PAGE (GUI Python Generator)

1.2 Herramientas de hardware

- Computadora con Windows
- Raspberry Pi 2
- Protoboard
- Led Board.
- Cables dupont

El seguimiento del desarrollo de esta propuesta y las herramientas antes expuestas, se describen en la siguiente secuencia de pasos:

Paso 1.- Se instala Raspbian en Raspberry Pi. Esto se logra siguiendo la guía de instalación en el sitio oficial, y verificando que la placa tenga video en la salida y que inicie de modo normal.

Paso 2.- Se conecta el Led Board a la placa.

Hasta este punto, lo que realmente nos falta es el software HMI en Python para que se pueda ejecutar dentro de Raspberry pi. Para hacer esto, nos apoyamos de una PC en Windows.

Paso 3.- Instalar Python para Windows, necesario para ejecutar y probar nuestra aplicación, antes de subir el código a la placa.

Paso 4.- Instalar Tcl/tk. (ActiveTcl8.6.4.1.299124-win32-ix86-threaded.exe), esta aplicación es necesaria para la ejecución de PAGE.

Paso 5.- Instalar PAGE en Windows. En el sitio oficial seguimos los pasos de instalación. (page-4.6.exe)

Se ejecuta la utilería incluida: `C:\>wish c:\page\>page.tcl %1`

Paso 6.- Se diseña el GUI dentro de PAGE del encendido y apagado de Leds para interactuar con el mouse, como se muestra en la Figura 1.

Esto se logra de manera sencilla, arrastrando y colocando los elementos en la disposición deseada, así como las propiedades necesarias para lograr la funcionalidad requerida. En la Figura 1 observamos el ambiente visual de la herramienta PAGE, el menú, las opciones y los paneles. En el centro de la figura se muestra el diseño de la forma con los leds, el cual se visualiza como se ejecutara en la placa RaspBerry Pi. En el panel Widget Toolbar encontramos los objetos gráficos que podemos incluir en nuestras aplicaciones como: Labels (etiquetas), Buttons (botones), Entrys (cuadros de texto) entre otros. En la ventana AttributeEditor se muestran las propiedades que se pueden editar en cada objeto gráfico seleccionado.

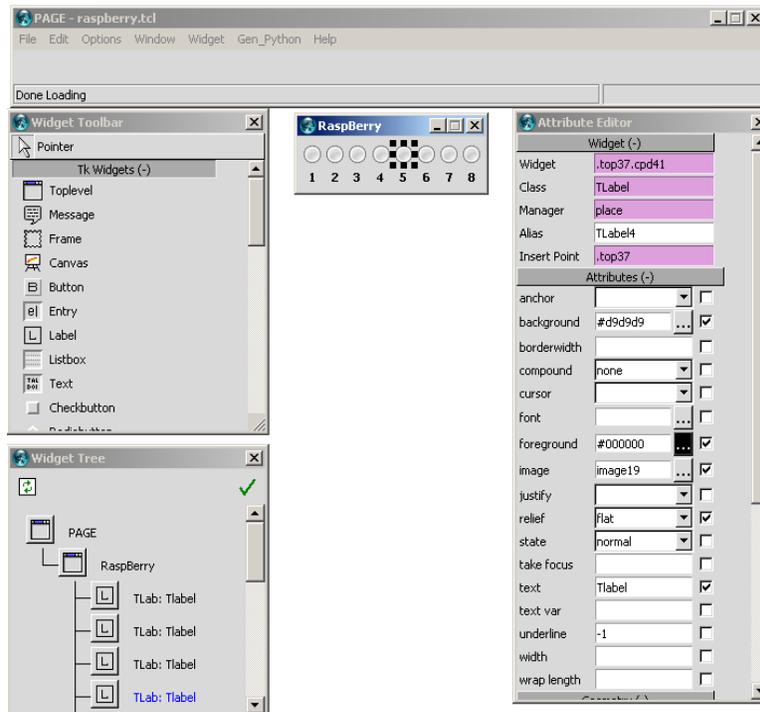


Figura 1. PAGE – Python Automatic GUI Generator

En el Figura 2 se muestra la versión final del diseño la interfaz gráfica.

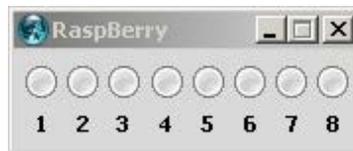


Figura 2. Diseño de GUI

Paso 7.- Exportar el código del diseño.

PAGE nos genera 2 archivos con extensión py (proyecto.py y soporte.py) que son el esqueleto del GUI, esto se logra seleccionando el menú principal **Gen_Python** y después la opción **Generate Python Gui** como se observa en la figura 3.

Paso 8.- Modificar el código en Python de PAGE.

Es necesario editar el archivo proyecto.py para agregar los eventos de los clicks (lamda expresión). En el Anexo A, se puede visualizar el código final integrado.

Paso 9.- Dentro de la placa RaspBerry Pi, se instalan los siguientes paquetes dentro del intérprete de Python:

- Thinker necesario para ejecutar GUI's con Python.
- Librería de GPIO que permiten Python el acceso a las salidas y entradas de RaspBerry Pi.

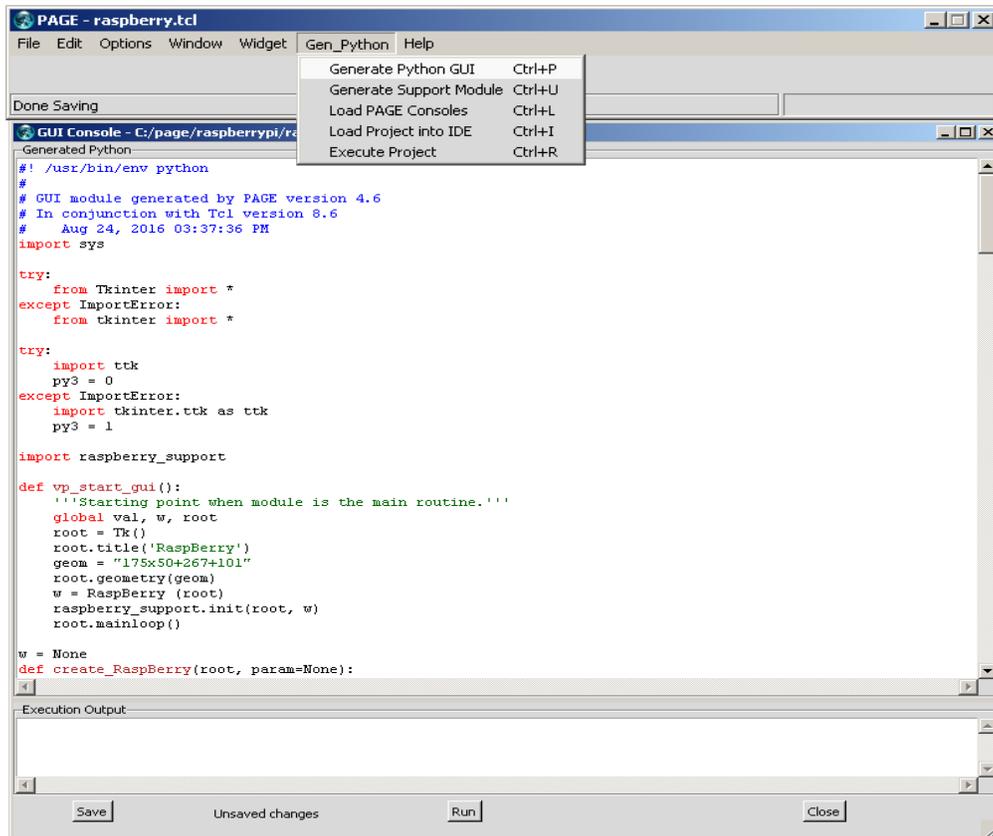


Figura 3. Código generado por PAGE

En el código final (Anexo A), vemos el uso de las funciones lambda en Python, las cuales no necesitan ser explícitamente nombradas. Esto es, la función (1) puede ser reescrita como una función anónima (2) (que se lee: “los valores de ‘x’ y de ‘y’ se mapean a la suma de x + y”).

$$x, y \rightarrow x + y \tag{1}$$

$$S(x, y) = x + y \rightarrow x + y \tag{2}$$

Del mismo modo, $I(x) = x$ puede ser reescrita de forma anónima como $x \rightarrow x$, que se lee: “el argumento x se mapea a sí mismo”. En Python, lambda nos sirve para crear pequeñas funciones anónimas, de una sola línea sobre la ejecución del programa. Las funciones anónimas pequeñas se pueden crear con la palabra clave lambda. Por ejemplo: esta función devuelve la suma de sus dos argumentos en código Python: *lambda a,b: a+b*.

Las funciones lambda pueden utilizarse siempre que se requieren objetos de función. Ellos se limitan sintácticamente a una sola expresión. Python permite definir funciones mínimas de una línea sobre la ejecución. Estas funciones son anónimas y usan la palabra reservada lambda, pero para los casos simples como este, puede utilizar una expresión lambda como un enlace entre Tkinter y la función de devolución de llamada como la que se muestra en el código: *def callback(para, gpio)* (Anexo A).



3. Resultados

Se ha obtenido resultados satisfactorios en la comunicación y la respuesta con la placa Raspbian Pi. Se pudo observar la respuesta en tiempo real del encendido y apagado de los 8 leds desde la interface gráfica al instante de presionar los leds del HMI.

También se apreció el beneficio en tiempo que nos ofrece PAGE en el desarrollo, generando el código inicial, para solo codificar minimamente las funcionalidades que se ocuparon para los eventos de los clicks, el envío hacia los GPIO's y la animación de la imagen del led encendido o apagado respectivamente. A continuación en la figura 4, se muestra la placa Raspberry Pi conectada a los leds en el protoboard, donde se aprecia también la HMI en ejecución en el monitor.

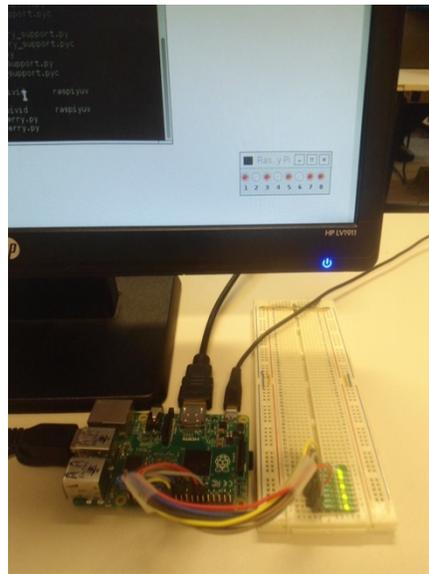


Figura 4. Raspberi Pi

4. Conclusiones

En esta propuesta didáctica se expone la elaboración de un HMI y la guía de la implementación de tecnologías de código abierto utilizadas para para el desarrollo de interfaz gráfica hombre-máquina usando RAD para RaspBerry Pi, aportando habilidades para elaborar proyectos de mayor complejidad, haciendo uso de elementos de gráficos, para ahorrar tiempo en el diseño de las interfaces con el usuario, lo cual nos facilita poder visualizar la interface antes de probarla y ponerla en marcha. Constatamos también el beneficio del uso de PAGE en la generación de código cuando se desee elaborar proyectos HMI de mayor alcance, y de rápido prototipado.

Con esta propuesta se demuestra también el beneficio de acortar el tiempo de diseño y programación de una interfaz gráfica, facilitando al desarrollador la generación de un código estático de la parte visual, además de poder visualizar la interface gráfica antes de incluir más funcionalidades a medida, a lo que muchos llaman: WYSIWYG (*What you see is what you get*), con lo que se puede tener un boceto del proyecto antes de incluir desarrollo, y la facilidad de trabajar con en la herramienta RAD.

También es importante resaltar que en la propuesta didáctica se hizo el uso de tecnologías de software de código libre [12], que respeta la libertad de los usuarios, de la comunidad, la ética y de



lo cual en la educación cumple con sus misiones fundamentales: de difundir el conocimiento y enseñar a los estudiantes a ser buenos miembros de su comunidad y compartir el código.

Como propuesta futura se pretende elaborar ejemplos didacticos para controlar diferentes dispositivos electronicos que faciliten al usuario la integracion en aplicaciones de mayor alcance o complejidad.

5.Anexo A

```
# Para la funcionalidad de GPIOs ....
import raspberry_support
import RPi.GPIO as GPIO
GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setup(17,GPIO.OUT)
GPIO.setup(27,GPIO.OUT)
GPIO.setup(22,GPIO.OUT)
GPIO.setup(10,GPIO.OUT)
GPIO.setup( 9,GPIO.OUT)
GPIO.setup(11,GPIO.OUT)
GPIO.setup( 8,GPIO.OUT)
GPIO.setup( 7,GPIO.OUT)
GPIO.output(17,False)
GPIO.output(27,False)
GPIO.output(22,False)
GPIO.output(10,False)
GPIO.output( 9,False)
GPIO.output(11,False)
GPIO.output( 8,False)
GPIO.output( 7,False)
#Fin del codigo de inicialición de GPIO
#Inicia código generado por PAGE ...
#####
#!/usr/bin/env python
#
# GUI module generated by PAGE version 4.6
# In conjunction with Tcl version 8.6
# Feb 24, 2016 06:27:28 PM
import sys

try:
    from Tkinter import *
except ImportError:
    from tkinter import *

try:
    import ttk
    py3 = 0
except ImportError:
    import tkinter.ttk as ttk
    py3 = 1

def vp_start_gui():
    """Starting point when module is the main routine."""
    global val, w, root
    root = Tk()
```



```
root.title('RaspBerry Pi')
root.resizable(width=FALSE, height=FALSE)
root.wm_iconbitmap("@icon1.xbm")
geom = "175x50+451+151"
root.geometry(geom)
w = RaspBerry (root)

raspberry_support.init(root, w)
root.mainloop()

w = None
def create_RaspBerry(root, param=None):
    """Starting point when module is imported by another program."""
    global w, w_win, rt
    rt = root
    w = Toplevel (root)
    w.title('RaspBerry')
    geom = "175x50+451+151"
    w.geometry(geom)
    w_win = RaspBerry (w)
    raspberry_support.init(w, w_win, param)
    return w_win

def destroy_RaspBerry():
    global w
    w.destroy()
    w = None

class RaspBerry:

    def __init__(self, master=None):
        # funcionalidad de BlinkingLEDs
        ion = PhotoImage(file="./ledon.gif")
        ioff= PhotoImage(file="./ledoff.gif")
        def callback(para, gpio):
            if para["text"] == "0":
                para.configure(text="1")
                para.configure(image=ion)
                GPIO.output(gpio,True)
            else:
                para.configure(text="0")
                para.configure(image=ioff)
                GPIO.output(gpio,False)
        # Continúa código generado por PAGE ...
        #####
```

Referencias

- [1] R. Buyya, A. Vahid Dastjerdi. *"Internet of Things Principies and Paradigms"*. Elsevier, May 11, 2016
- [2] A. Rodríguez Penin. *"Sistemas Scada"*, Ed.Marcombo, 2ed. Jul 1, 2012
- [3] J. Holler, V. Tsiatsis, C. Mulligan, S. Avesand, S. Karnouskos, D. Boyle. *"From Machine-to-Machine to the Internet of Things: Introduction to a New Age of Intelligence"* Academic Press, Apr 8, 2014
- [4] <https://www.gnu.org/education/education.es.html>



- [5] <https://www.raspbian.org/>
- [6] Mark J. Johnson. “*A Concise Introduction to Programming in Python*”, Tylor & Francis Group, USA, 217 páginas, Publicado en 2012.
- [7] <http://page.sourceforge.net>
- [8] <http://www.agilemanifesto.org/iso/es/>
- [9] <https://docs.python.org/2/tutorial/classes.html>
- [10] <https://www.raspberrypi.org>
- [11] <https://www.tcl.tk>
- [12] <http://www.fsf.org/licensing/essays/free-sw.html>



Sistema de adquisición de datos con plataforma híbrida FPGA-ARM

¹Rodríguez-Ojeda J.J., ²Rivas-Araiza J.E., ²Talavera-Velázquez D., ²Toledano-Ayala M., ²Rivas-Araiza E.A.

¹Universidad Autónoma de Sinaloa ²Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, Querétaro, Qro. CP 76010.

*Autor por correspondencia (erivas@uaq.mx)

Resumen

En este trabajo se presentan las consideraciones de diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos con plataforma híbrida basada en FPGA-CPU(ARM), con el objetivo de satisfacer los requerimientos de entrada/salida y capacidad de visualización, almacenamiento de datos y comunicaciones para una aplicación de un sistema de posicionamiento de tres ejes. La combinación efectiva de la tecnología FPGA con ARM proporciona una alternativa confiable y eficiente para adquisición de datos en un sistema embebido con un tiempo de desarrollo menor. Se describen los módulos implementados para un sistema de posicionamiento lineal de tres ejes, tales como interface SPI, decodificador/contador para encoder óptico incremental e interface UART. Mientras que el FPGA tiene como finalidad potenciar las capacidades de entrada/salida con módulos independientes que se procesan en paralelo, la tecnología CPU(ARM) facilita el desarrollo de la lógica de control y manejo de interfaces de comunicación avanzadas de manera ágil, mediante el uso de lenguajes de alto nivel y sistemas operativos embebidos. El desempeño de la plataforma propuesta se analiza en un mecanismo de posicionamiento lineal de tres ejes, el cual emplea motores de CD con retroalimentación por encoder óptico incremental.

Palabras clave: Adquisición de datos , FPGA, ARM, Sistema Embebido.

1. Introducción

El uso de dispositivos electrónicos para medición, almacenamiento, monitoreo y transmisión de datos a localidades remotas a través de una red es uno de los problemas principales en diversos campos de la ingeniería. Estos dispositivos pueden construirse empleando distintas combinaciones de hardware y software para adquisición de datos (DAQ) que buscan satisfacer los requerimientos de una aplicación determinada, sin embargo, la selección de un sistema DAQ no es una tarea sencilla, debido a los requerimientos de tiempo de muestreo, número de canales de entrada/salida, resolución, tipo de señales y velocidad de procesamiento, por mencionar algunos. El problema cobra particular importancia en el ámbito de la investigación, cuando se requiere monitorear y analizar procesos o fenómenos poco comunes, los cuales generalmente tienen necesidades más exigentes o específicas. A pesar de que comercialmente se dispone de diversas opciones para adquisición de datos de propósito general de reconocidos fabricantes como National Instruments y Advantech, por citar algunos de los más conocidos, presentan inconvenientes debido a su alto costo.

Aunado a lo anterior, para determinadas aplicaciones no existen dispositivos comerciales que se reúnan las características necesarias, creando la necesidad de diseñar y desarrollar dispositivos DAQ a la medida. Los dispositivos de arreglos de compuertas programables en campo (*Field Programmable Gate Array* o FPGA, por sus siglas en inglés) constituyen una tecnología



reconfigurable de alto desempeño que ofrecen cómputo paralelo a nivel de bit, quedando demostradas sus capacidades en aplicaciones de monitoreo y control de energía eléctrica [1], espectroscopio de rayos X [2], procesamiento en tiempo real de señales electrocardiográficas (ECG, por sus siglas en inglés) [3] y control de diversos tipos de motores eléctricos [4]–[6], por mencionar algunas. Las ventajas de usar dispositivos FPGA, como se ha mencionado, es su capacidad de procesamiento paralelo, su reconfigurabilidad y alta velocidad, lo cual los hace dispositivos muy versátiles y flexibles para aplicaciones que demanden control preciso y ejecución en tiempo real.

Sin embargo como desventaja se considera el tiempo de desarrollo, ya que para tener un control preciso del funcionamiento de la lógica reconfigurable se emplean lenguajes de bajo nivel para descripción de hardware, referido como HDL (*Hardware Description Language*); dos de los HDL más conocidos lo constituyen los lenguajes VHDL y Verilog. La complejidad para codificar un sistema digital en un dispositivo programable tiene repercusiones en el tiempo de desarrollo, o en el costo al requerirse librerías específicas, referidas como IP-Cores.

Por tal motivo, en adición al uso de los IP-Cores como una medida para agilizar el proceso de diseño y desarrollo de un sistema digital basado en dispositivos programables, se tienen como alternativa el uso de compiladores de lenguajes de alto nivel, como Handel C, el cual permite compilar algoritmos de alto nivel directamente en hardware a nivel de compuertas [7]. Handel-C incluye el manejo de variables de distinto tipo, procesamiento paralelo y manejo de hilos, por mencionar algunas características [8]. Otra opción para desarrollo consiste en sintetizar el hardware de un microprocesador en el dispositivo programable, lo que se conoce como “*soft-processor*”; de tal forma que se habilita el intercambio de datos entre el microprocesador embebido y módulos externos descritos en HDL mediante un bus específico para ello, los ejemplos más claros los constituyen los procesadores de arquitectura RISC (conjunto reducido de instrucciones, por sus siglas en inglés) Picoblaze y Microblaze del fabricante Xilinx; y los procesadores Nios de Altera. De esta forma se destina cierta capacidad de compuertas para implementación del procesador, el cual se puede integrar junto con compiladores de lenguajes de alto nivel para combinar el desempeño del FPGA con la flexibilidad y versatilidad del procesador [9].

La desventaja del esquema anterior es que los *soft-processors* consumen parte de los recursos disponibles del FPGA y debido a la arquitectura que emplean, el código y compiladores usados solo guarda compatibilidad con los dispositivos de determinado fabricante lo cual limita la reusabilidad del código. Actualmente el uso de procesadores con arquitectura ARM (*Advanced RISC Machine*) ha ganado terreno en múltiples aplicaciones que van desde teléfonos celulares, tablets, computadoras y diversos dispositivos, al ser una arquitectura estándar cuenta con un amplio desarrollo de aplicaciones y sistemas operativos compatibles, lo que ha facilitado el concepto de SBC (*Single Board Computers*), concebidas como sistemas computacionales completos con capacidades que se asemejan a las de una computadora personal, pero en menor escala; ejemplo de tarjetas SBC comerciales incluyen las plataformas Raspberry Pi, Beagle Bone Black, Odroid y PandaBoard, por citar algunas. Las cuales exhiben excelentes propiedades para implementar sistemas operativos e interfaces avanzadas (USB, Ethernet, Bluetooth, WiFi y Pantallas LCD táctiles) de una manera efectiva.

Lo anterior ha dado lugar a diferentes tipos de estrategias y dispositivos que buscan integrar de la mejor manera los beneficios del uso de dispositivos programables FPGA y microprocesadores, en particular aquellos que utilizan la arquitectura ARM, de tal forma que se logre la meta de una plataforma con capacidades de procesamiento paralelo, reconfigurable, flexibilidad y versatilidad de desarrollo. Uno de los dispositivos comerciales que han adoptado dicha filosofía es el Zynq del fabricante Xilinx, definido como un sistema en un chip (SoC, *System on a Chip*) programable, el cual implementa una arquitectura innovadora que combina la tecnología ARM con FPGA en el mismo circuito. A nivel comercial existen varias plataformas de desarrollo que emplean el dispositivo Zynq, tales como la Zybo de Digilent Inc (www.digilentinc.com) y las placas Microzed y Picozed de ZedBoard (www.zedboard.com).



En este trabajo se presenta el diseño de un sistema de adquisición de datos reconfigurable para aplicación en un sistema de posicionamiento lineal de tres ejes en una plataforma FPGA-ARM, de tal forma que se obtenga una plataforma robusta, potente, versátil y de bajo costo para implementación de técnicas de control automático clásicas y avanzadas del sistema de posicionamiento no convencionales. La organización del artículo es como sigue: en la sección dos se presentan las consideraciones teóricas de diseño para el sistema DAQ, y en la sección tres se describe la metodología empleada para su implementación en la tarjeta. Finalmente en las secciones cuatro y cinco se muestran los resultados obtenidos acompañados de una discusión y conclusiones de los mismos.

2. Sistema DAQ

En este apartado se presentan los requerimientos para adquisición de datos (DAQ) de un sistema de posicionamiento de tres ejes actuado por motores de CD con retroalimentación por encoder óptico incremental en cuadratura. Asimismo se describe el diseño de los componentes de entrada salida requeridos para la instrumentación del sistema de posicionamiento, partiendo de su descripción empleando máquinas de estado finito (FSM).

2.1 Arquitectura general del sistema

Se requiere un sistema DAQ para un sistema de posicionamiento cartesiano de tres ejes (X,Y,Z) con motores de corriente directa con encoder óptico incremental en cuadratura, el cual debe tener la capacidad para generar salidas moduladas por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés), captación de señales de encoder, entradas analógicas y entradas/salidas digitales de propósito general. Aunado a lo anterior se desea contar con capacidades de comunicación avanzadas como WiFi, Ethernet o USB, con estas características es posible realizar el monitoreo y control del sistema de posicionamiento para una gran variedad de aplicaciones, para lograrlo se propone una plataforma híbrida FPGA-ARM, que como se ha mencionado, permite lograr una arquitectura potente, flexible y versátil. En la Figura 67 se presenta el diagrama de bloques del sistema DAQ.

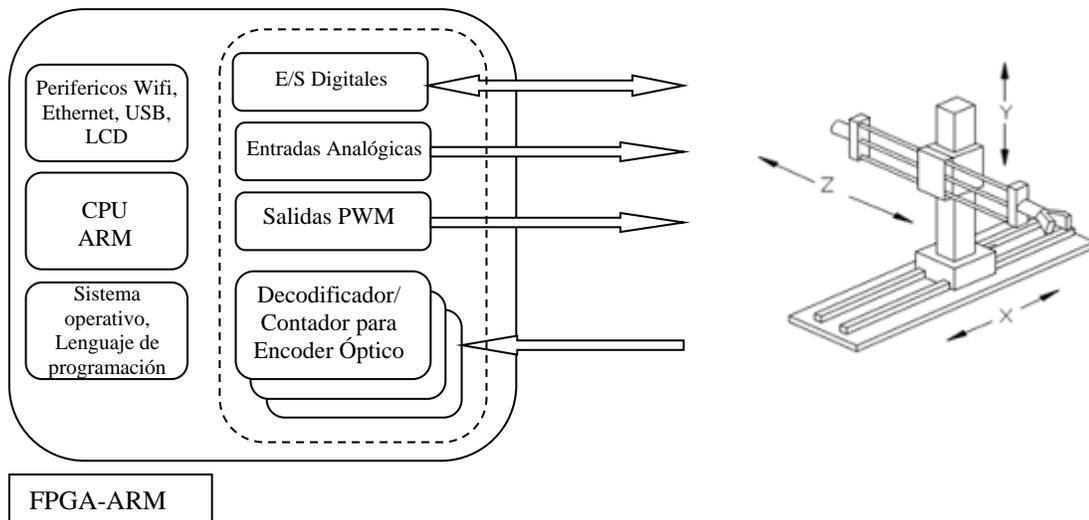


Figura 67. Arquitectura general del sistema DAQ para monitoreo y control de un sistema de posicionamiento de tres ejes.

De la Figura anterior se establece que los requerimientos de E/S especializados pueden generarse y reproducirse eficientemente usando recursos de un FPGA, mientras que las tareas de



procesamiento de datos, comunicaciones y almacenamiento se pueden implementar más adecuadamente en un procesador ARM provisto con las interfaces necesarias para tal fin. En las secciones siguientes se describe el diseño de los módulos de interface, tales como ADC-SPI, decodificador/ contador de señales en cuadratura y señales PWM.

2.2 Descripción de componentes de E/S

A. ADC SPI

Como parte de los requerimientos para el sistema DAQ se considera dotar de 8 entradas analógicas en el rango de 0-5 volts sin acondicionamiento de señal y con una resolución mínima de 10 bits, mismo que se logra con ayuda de un circuito ADC externo con bus de comunicación serial para un mejor aprovechamiento de los pines de entrada/salida. Actualmente están disponibles en el mercado una amplia variedad de circuitos ADC con interface serial, misma que se describe a continuación.

El protocolo de comunicación SPI (Serial Peripheral Interface) es un bus de comunicación serial del tipo *full-duplex*, de alta velocidad, requerimientos de hardware sencillos y protocolo flexible; que permite a un dispositivo maestro iniciar comunicación con un dispositivo esclavo [10]. El protocolo SPI especifica cuatro tipos de señales para la comunicación:

- MISO (*Master In Slave Out*): Representa la señal de datos de salida que van desde el esclavo hacia el maestro.
- MOSI (*Master Out Slave In*): Denota la señal de datos de salida serial que viajan desde el maestro hacia el esclavo.
- SCLK (*Serial Clock*): Salida de reloj generada por el dispositivo maestro, define la velocidad a la que se realiza la comunicación.
- SS (*Slave Select*): Esta señal actúa como una línea para habilitación del dispositivo esclavo, de tal forma que el maestro puede controlar múltiples esclavos generando varias salidas SS, una para cada esclavo conectado al bus.

En la comunicación SPI, la señal de reloj es generada por el maestro para proporcionar la sincronización, de tal forma que controla el tiempo en que los datos seriales pueden cambiar y cuando son validos para lectura. El protocolo SPI se define como un protocolo de intercambio de datos donde los dispositivos no pueden ser solo transmisores o receptores, en cada operación se realiza una transferencia de datos desde el maestro hacia el esclavo y viceversa, donde la velocidad de transferencia está controlada por la señal de reloj.

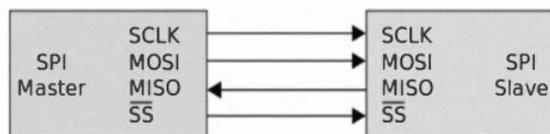


Figura 68. Diagrama de bloques de la comunicación SPI [11].

La flexibilidad y velocidad del protocolo SPI lo hacen ideal para aplicaciones de alta velocidad, tales como los convertidores analógico a digital, en este trabajo se utiliza un convertidor analógico digital de 8 canales y 10 bits de resolución con protocolo de comunicación SPI, modelo MCP3008 del fabricante Microchop, el cual tiene una velocidad de muestreo máxima de 200 mil muestras por segundo. La frecuencia de reloj del ADC varía desde 1.35 MHz a 3.5 MHz dependiendo su voltaje alimentación de puede ser desde 2.7 hasta 5 volts, en este trabajo la alimentación del circuito se realizó con un voltaje de 3.3 V y una frecuencia de reloj de 1.95 MHz. En la Figura 69 se observa el encapsulado y diagrama de bloques del circuito.

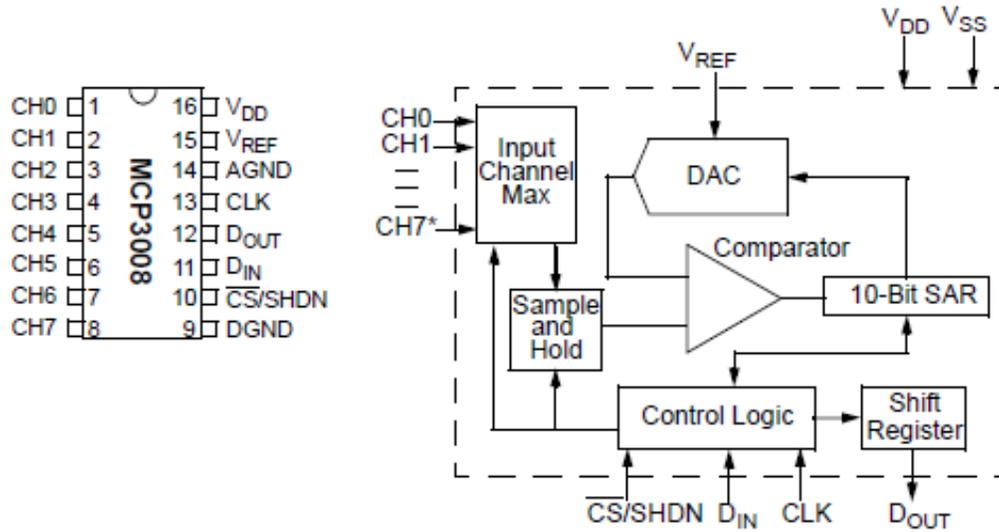


Figura 69. Encapsulado y diagrama a bloques del MCP3008.

En la Tabla 10 se muestra la descripción de cada uno de los pines del circuito MCP3008, es importante hacer notar la equivalencia de las señales definidas por el fabricante y su correspondencia de acuerdo a la notación del protocolo SPI explicado anteriormente. En la Figura 70 se presenta la forma de onda de la temporización de las señales necesarias para realizar la conversión de variable analógica a digital.

Tabla 10. Tabla de descripción de pines del MCP3008

Pin	Símbolo	Descripción
1	CH0	Entrada Analógica
2	CH1	Entrada Analógica
3	CH2	Entrada Analógica
4	CH3	Entrada Analógica
5	CH4	Entrada Analógica
6	CH5	Entrada Analógica
7	CH6	Entrada Analógica
8	CH7	Entrada Analógica
9	DGND	Tierra Digital
10	CS/SHDN	Selección de Circuito (SS)/Entrada de Apagado
11	DIN	Entrada Datos Serial (MOSI)
12	DOUT	Salida Datos Serial (MISO)
13	CLK	Reloj (SCLK)
14	AGND	Tierra Analógica
15	VREF	Entrada de Voltaje de Ref.
16	VDD	Fuente de Voltaje (2.7 a 5 V)
-	NC	Sin Conexión

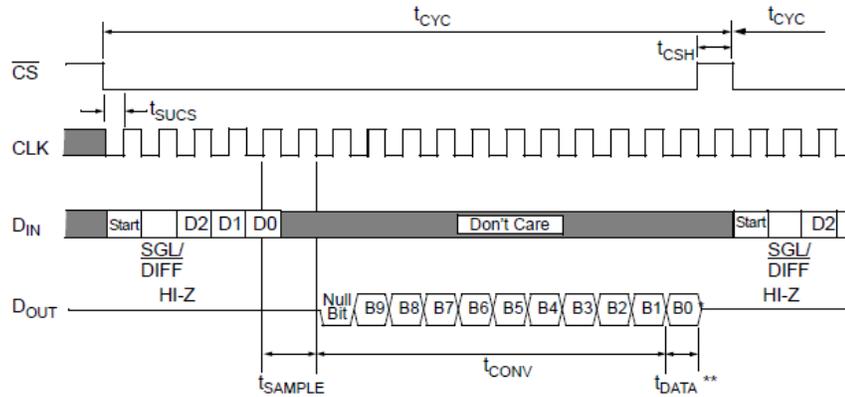


Figura 70. Diagrama de temporización de señales para conversión analógica a digital.

De la Figura 70 se puede observar la secuencia de las señales tanto del maestro como del esclavo, necesarias para llevar a cabo el muestreo y digitalización de una señal analógica. La secuencia comienza con la activación de la señal de habilitación CS en nivel bajo, posteriormente el maestro envía un bit de arranque seguido de un grupo de bits (SGL/DIFF, D2, D1 y D0) que son los que configuran la selección del canal analógico y la configuración de entrada (modo común o diferencial). En la Tabla 2 se describe la combinación de señales para selección de configuración de entrada y selección de canal.

Tabla 11. Tabla de configuración de los canales de muestreo

SGL/DIFF	D2	D1	D0	Configuración de entrada	Selección de Canal
1	0	0	0	Modo común	CH0
1	0	0	1	Modo común	CH1
1	0	1	0	Modo común	CH2
1	0	1	1	Modo común	CH3
1	1	0	0	Modo común	CH4
1	1	0	1	Modo común	CH5
1	1	1	0	Modo común	CH6
1	1	1	1	Modo común	CH7
0	0	0	0	Diferencial	CH0 = IN+ CH1 = IN-
0	0	0	1	Diferencial	CH0 = IN- CH1 = IN+
0	0	1	0	Diferencial	CH2 = IN+ CH3 = IN-
0	0	1	1	Diferencial	CH2 = IN- CH3 = IN+
0	1	0	0	Diferencial	CH4 = IN+ CH5 = IN-
0	1	0	1	Diferencial	CH4 = IN- CH5 = IN+
0	1	1	0	Diferencial	CH6 = IN+ CH7 = IN-
0	1	1	1	Diferencial	CH6 = IN- CH7 = IN+

Los datos enviados a través de la terminal DIN deben ser estables en el flanco de subida de la señal de reloj CLK para que el ADC MCP3008 pueda interpretarlos correctamente, una vez que se han enviado los bits de configuración el muestreo de la señal analógica se realiza dentro de los próximos 1.5 ciclos de reloj a partir del momento en que se envió el último bit de configuración (D0). Una vez finalizado el tiempo de muestreo (t_{SAMPLE}) se inicia la conversión a digital la cual se transmite desde el esclavo hacia el maestro por medio del pin DOUT, el cual inicia enviando un "bit nulo" seguido de 10 bits de datos de más significativo (MSB) a menos significativo (LSB), de tal forma que



le toma diez ciclos de reloj (t_{CONV}) al ADC realizar la conversión de analógico a digital, para posteriormente desactivar el ADC durante 1.5 ciclos de reloj (t_{CSH}) antes de iniciar una nueva conversión.

Para su implementación en HDL se realizó una máquina de estados finitos, misma que se presenta en la Figura 71, el módulo de control ADC-SPI tiene como entradas señales de reloj maestra (CLK), reset (RESET), entrada datos MOSI (DOUT), Modo (Entrada[3:0]), Inicio (START) y de sincronización (SOPC[1:0]). Como salidas del módulo se incluyen salida de selección de circuito SPI esclavo (CS), salida MISO (DIN), Salida de reloj SPI (DCLK) y salidas internas para sincronización con otros módulos EOP y Y[3:0]. Se definieron cinco bloques dentro del módulo, uno para generación de la señal de reloj SPI (Bloque_V1) el cual consta de un divisor de frecuencia el cual permite controlar la máquina de estados madre (Bloque_V3). El Bloque_V4 permite generar la secuencia de inicialización para transmitir la selección de canal y modo, acorde a la forma de onda de la Figura 70 y la selección de canales y modo según Tabla X. El receptor SPI (Bloque_V5) consta de un registro de corrimiento que captura los 10 bits correspondientes al resultado de la conversión ADC, el cual almacena el resultado en la señal DATO[9:0]. La sincronización y operación de los bloques queda determinada por la máquina de estados madre, la cual recibe como entrada un pulso en la terminal START, lo que da inicio al proceso de muestreo, conversión y captura de resultado del ADC-SPI.

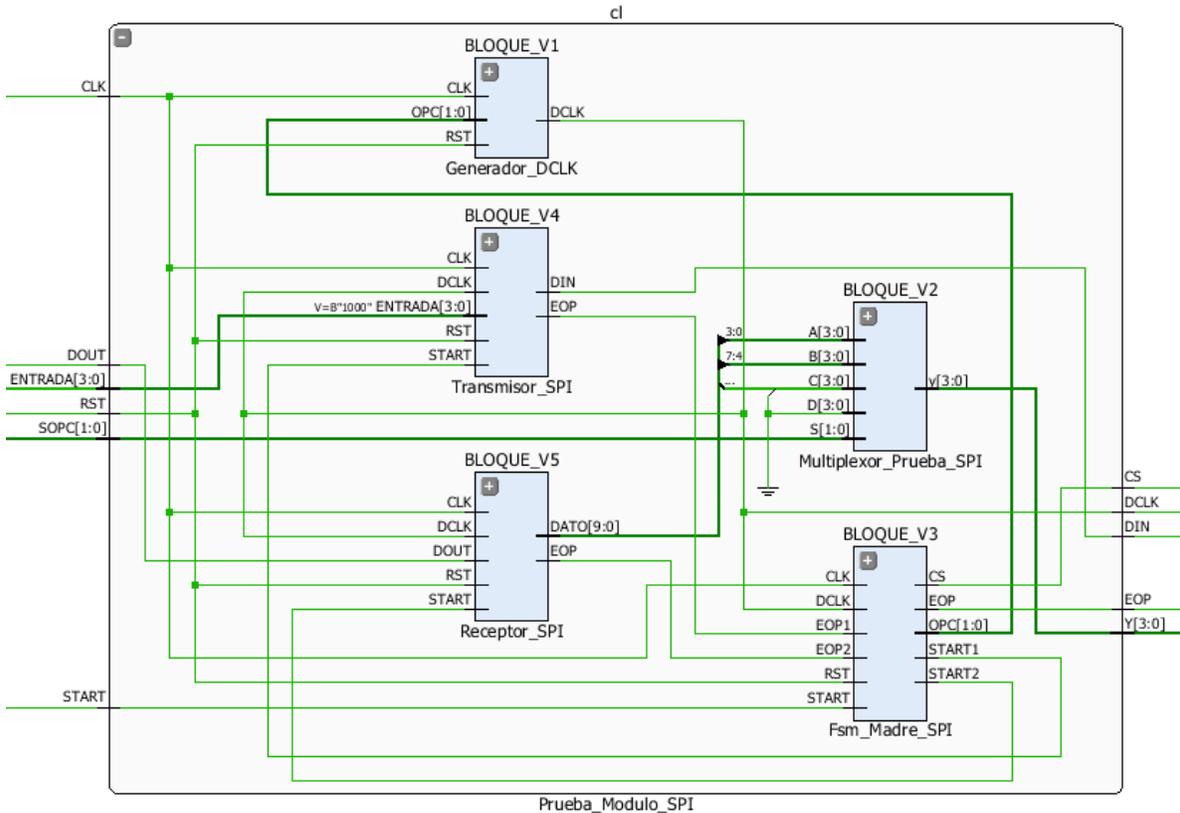


Figura 71. Diagrama de módulos de firmware para comunicación SPI

B. Decodificador/Contador para encoder

Uno de los dispositivos de retroalimentación de posición más comunes en motores eléctricos es el denominado encoder óptico incremental con salidas en cuadratura, el cual permite detectar el movimiento de rotación de la flecha del motor. El desempeño de un servosistema depende en gran medida de la exactitud de la posición del motor [12], por tal motivo los encoder ópticos incrementales



son ampliamente usados para obtener retroalimentación de posición en el lazo de control. Los encoder ópticos incrementales convierten la rotación de la flecha del motor en pulsos eléctricos por medio de un disco conectado a la flecha del motor, el cual tiene un patrón de marcas opacas y transparentes que modulan un haz de luz emitido por una fuente de luz (ver Figura 72(b)). La luz modulada puede captarse por medio de sensores de ópticos, lo cuales generan dos señales defasadas 90° eléctricos tal como se muestra en la Figura 72(a).

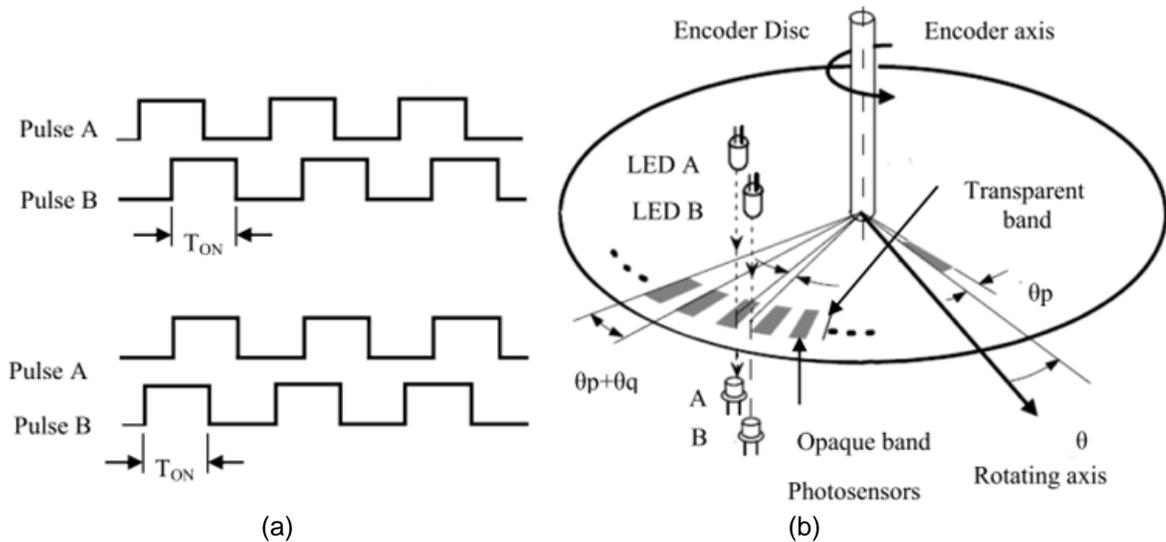


Figura 72. (a) Principio de construcción de un encoder óptico incremental en cuadratura y (b) salidas de pulsos para el caso de rotación en sentido horario (arriba) y atihorario (abajo) [13].

De acuerdo a la Figura 72(a) se observa que las señales cambian siguiendo el código Gray de forma ascendente para el caso de rotación de la flecha del motor en sentido horario y en forma descendente en el caso de movimiento de la flecha en sentido antihorario. De tal forma que se identifican cuatro estados estables para las señales del encoder, cada una de las cuales recibe el nombre de canal (A y B).

	Canal A	Canal B
CCW ↑	1	0
	1	1
	0	1
	0	0
↓ CW		

Se considera que cada cambio de estado corresponde al incremento angular más pequeño que puede detectar el encoder, el cual se denomina “cuenta”, un encoder tiene una resolución total dada en forma de cuentas de encoder por revolución. La resolución angular se calcula de acuerdo a:

$$\text{Res. Angular} = 360^\circ / \text{No. Cuentas por Revolución}$$

El número de cuentas por revolución suele ser un dato dado por el fabricante, así por ejemplo un encoder de 200 cuentas por revolución tiene una resolución angular de 1.8° , lo cual es el incremento angular más pequeño que se puede detectar por el encoder. Es importante no confundir el concepto de “pulsos de encoder” con “cuentas de encoder” ya que el primero se refiere a los pulsos generador por un solo canal, el cual no permite determinar el sentido del giro del motor, tan solo el incremento angular en la posición en cualquier sentido, el cual suele ser más grande que el de una cuenta.



De lo anterior se deduce que para interpretar y usar la información de los encoders se requiere un circuito que puede detectar (decodificar) los instantes en que ocurre un cambio de estado en los canales A y B, y de acuerdo al orden en que ocurre una transición se incrementa o decrementa un contador binario, la posición del motor se puede entonces determinar multiplicando el valor del contador por la resolución. En la actualidad son comunes los encoders ópticos incrementales de 4,000 cuentas por revolución (0.09°) por lo que se requieren contadores con la capacidad de contar los pulsos generados por el encoder en todo el recorrido del mecanismo donde estén colocados, siendo común en los dispositivos comerciales definir contadores con un ancho de palabra de 32 bits, con lo cual se puede almacenar cuentas en el rango $[-2,147,483,648, 2,147,483,647]$, lo cual puede ser más que suficiente para la mayoría de las aplicaciones.

El diseño de un dispositivo para captación de la posición de un motor comprende de este modo en un (a) decodificador y (b) un contador binario ascendente/descendente de un tamaño adecuado, mientras que la descripción de hardware de un contador binario ascendente/descendente es una práctica común en el diseño HDL, el decodificador requiere el uso de una máquina de estados que permita detectar el cambio de estados de las señales de encoder y generar señales que realicen la cuenta arriba, cuenta abajo o mantengan invariante el valor del contador. En este trabajo se propone implementar el método propuesto por Romero-Troncoso [15] para decodificación de señales del encoder, en la Figura 73 se observa la máquina de estados para decodificación de las señales en cuadratura.

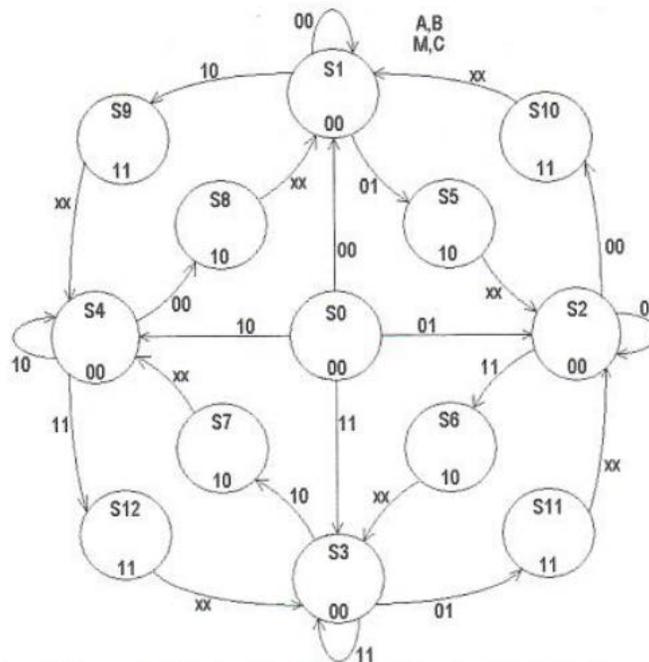


Figura 73. Máquina de estados para decodificación de señales de encoder [15].

El funcionamiento de la máquina de estados es como sigue: inicialmente se encuentra activo el estado S_0 , en el cual el estado de los canales del encoder se considera desconocido, en el siguiente ciclo de reloj se muestrea el valor de entrada de los canales, lo cual causa una transición de S_0 hacia uno de los estados S_1 , S_2 , S_3 ó S_4 según el valor leído en los canales del encoder. Seguidamente se estarán muestreando las entradas de encoder a frecuencia de reloj, en caso de que no exista transición permanecerán estables en alguno de los cuatro estados anteriores, en el momento en que ocurra un cambio en los canales de encoder, éste será detectado e indicado por alguno de los estados S_5 al S_{12} dependiendo del sentido de giro. Las salidas generadas para cada uno de los estados anteriores es de acuerdo a la Tabla 12. Salidas de control del contador ascendente/descendente.



Tabla 12. Salidas de control del contador ascendente/descendente

Opt [1:0]	Contador
00	Sin cambio
10	Decremento en 1
11	Incremento en 1

El módulo decodificador/contador para encoder queda entonces de la siguiente manera:

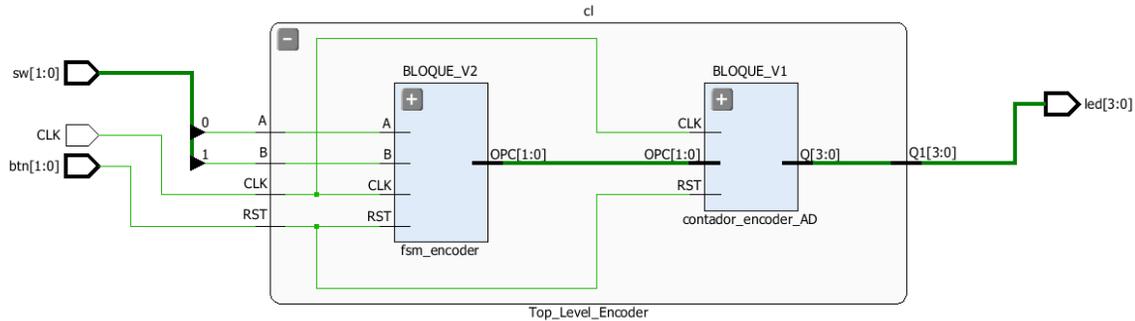


Figura 74. Diagrama de bloques para el módulo decodificador/contador para señales en cuadratura.

C. PWM

La modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) es una técnica ampliamente usada en aplicaciones de electrónica de potencia y control de movimiento [14], en el presente trabajo se plantea el uso de señales PWM junto con una etapa de potencia a base de transistores en configuración de puente H, para controlar la velocidad y el sentido de giro de un motor de corriente directa. Su implementación con técnicas digitales requiere el uso de un contador binario y un comparador de magnitud, como en el arreglo mostrado en la Figura 75, el primero es usado para generar una señal en forma de diente de sierra, iniciando la cuenta desde cero hasta un valor máximo, cuando el contador alcanza el tope regresa a cero. En cada ciclo de reloj principal se compara el valor presente en el contador con una magnitud almacenada en un registro, si el valor del registro es mayor al del contador se produce una salida de uno lógico.

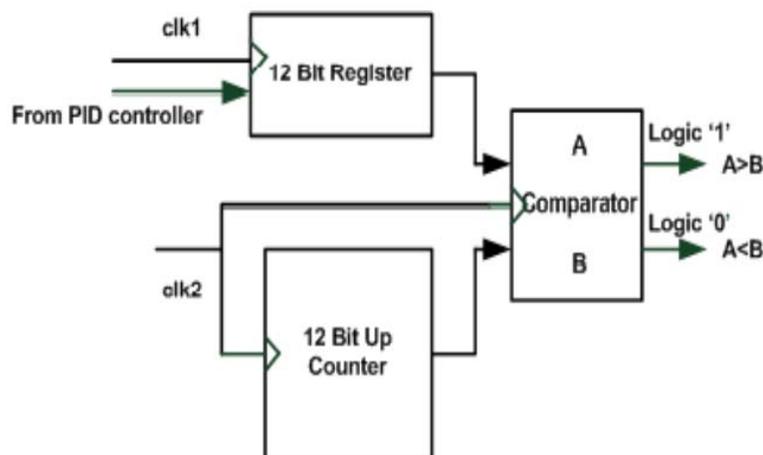


Figura 75. Diagrama de bloques de un módulo PWM digital [14].

La frecuencia se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Frecuencia PWM} = \text{Frecuencia del Contador} / (\text{Valor Máximo del Contador} + 1)$$



Mientras que el ciclo de trabajo se ajusta por medio del valor almacenado en el registro, el cual se calcula en forma de porcentaje:

$$\text{Ciclo de Trabajo} = (\text{Valor del Registro} / \text{Valor Máximo del Contador}) * 100\%$$

3. Resultados

Para la validación del diseño del sistema DAQ se utilizo una tarjeta FPGA-ARM Zybo Zynq del fabricante Digilent Inc., la cual emplea un oscilador de cristal de 50 MHz como base de tiempo, pero con ayuda de un módulo PLL interno se puede elevar la frecuencia a 125 MHz. El código VHDL desarrollado para los módulos se generó en el software Active HDL, a partir del cual se obtuvieron simulaciones para verificar el correcto funcionamiento, en la Figura 76 se presenta un ejemplo de la forma de onda obtenida para el caso del módulo ADC-SPI.

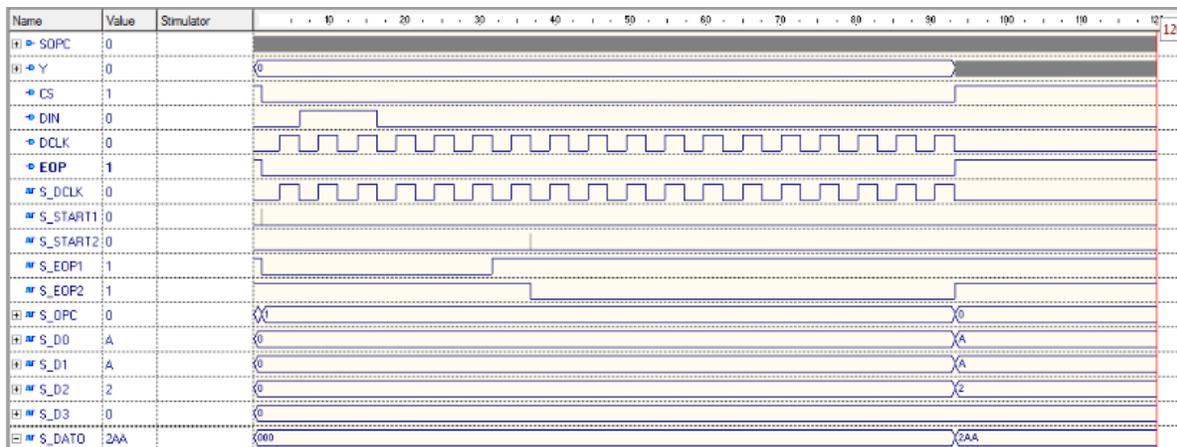


Figura 76. Formas de onda obtenidas en simulación para el módulo ADC-SPI.

La síntesis y programación de la tarjeta FPGA se realizo con ayuda del software Vivado de Xilinx versión 2016.2, el asistente de creación de proyecto (Figura 77) permite configurar la ruta del disco duro donde se almacenarán los archivos del proyecto, agregar código fuente o IP cores ya existentes, seleccionar el tipo de dispositivo a usar para la síntesis, el último paso es de particular importancia ya que es el que nos permite que a partir del código VHDL desarrollado se pueda obtener un archivo de programación correcto para la tarjeta Zybo, para tal fin se dispone una ventana de búsqueda donde se puede seleccionar el dispositivo a partir de la especificación del dispositivo por el tipo de familia (Artix, Kintex o Zynq) o por modelo de tarjeta de desarrollo, algunos de los modelos soportados incluyen las tarjetas ZedBoard de Avent o tarjetas Artix y Zynq de Xilinx, tal como se muestra en la Figura 78.



Figura 77. Creación de un nuevo proyecto desde Vivado.

Cabe señalar que la instalación de Vivado por defecto no incluye el modelo de la tarjeta Zybo, ni tampoco de otras tarjetas de Digilent como la Nexys y la Basys 3 por ejemplo. Para ampliar el catalogo de tarjetas soportadas y facilitar la configuración del proyecto se siguieron los pasos proporcionados por el fabricante, mismos que se pueden consultar en la siguiente dirección <https://reference.digilentinc.com/reference/software/vivado/board-files?redirect=1id=vivado:boardfiles>.

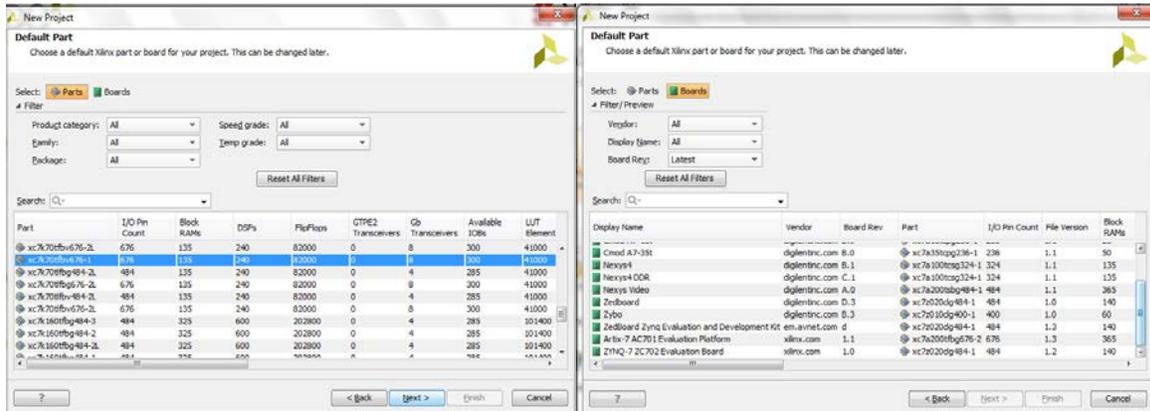


Figura 78. Selección de dispositivo para proyecto en Vivado.

Para la asignación de los pines de la tarjeta a las señales de los módulos se requiere editar un archivo de restricciones (*constraints*) con extensión *.xdc, el cual permite asignar el estándar de voltaje empleado y la selección del pin, en la Figura 79 se muestra la ubicación del archivo dentro del panel de administración del proyecto bajo la carpeta “Constraints” y un ejemplo de asignación de la señal “CIK” al pin L16 usando estándar de voltaje LVCMOS a 3.3 Volts.

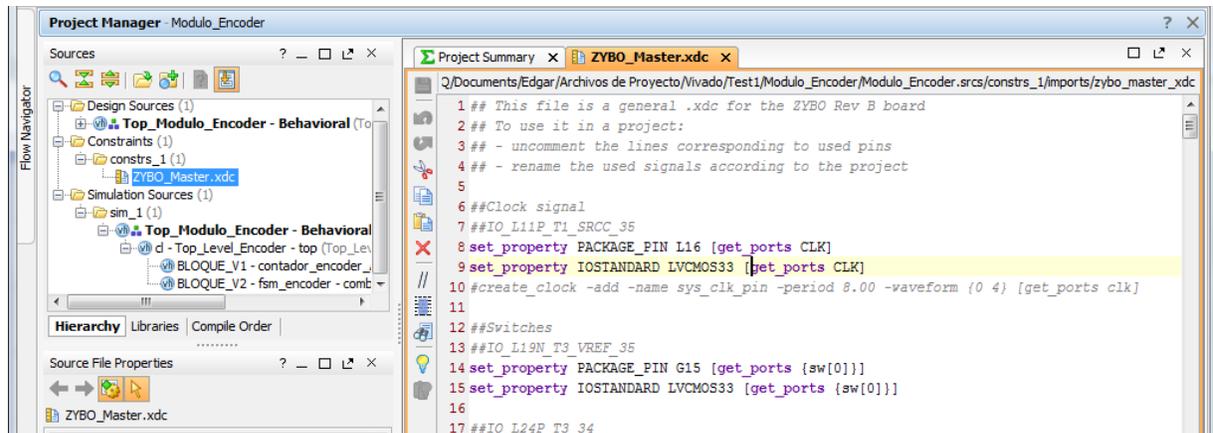


Figura 79. Asignación de las señales a los pines del FPGA.

Una vez creado el proyecto con los archivos fuente y las restricciones correspondientes se procede a la síntesis y descarga de configuración al FPGA, en la Figura 80 se observa el panel del “Navegador del Flujo” (*Flow Navigator*), donde son accesibles los botones para síntesis (*Run Synthesis*) y programación de hardware (*Hardware Manager*).

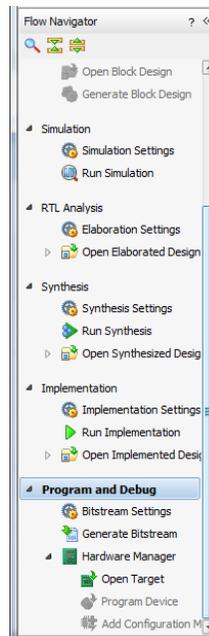


Figura 80. Navegador de flujo para selección de síntesis y programación de dispositivo.

Finalmente, con el dispositivo ya programado se procedió a realizar las conexiones correspondientes a los encoders, puentes H (basado en el popular driver L298 de ST) y el ADC que monitorean y controlan el sistema de posicionamiento XYZ, el cual puede observarse en la Figura 81.

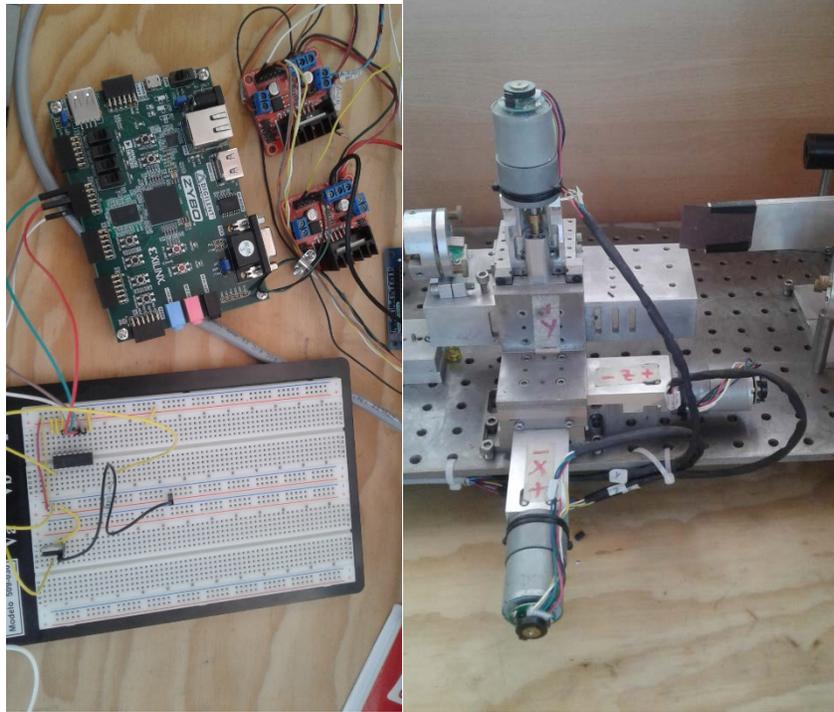


Figura 81. Sistema de adquisición de datos y control para máquina de posicionamiento de tres ejes XYZ.

Con la finalidad de hacer pruebas preliminares, se programaron distintas combinaciones de entradas y salidas de tal modo que se pudiera visualizar y controlar los módulos con ayuda de los interruptores y leds con los que cuenta la tarjeta. Así por ejemplo, se realizaron pruebas de control de velocidad con PWM controlando el ciclo de trabajo desde los cuatro interruptores asignándoselos a los cuatro bits más significativos de la palabra de control de ciclo de trabajo del módulo PWM.

Por otra parte, contar con un procesador ARM en la misma tarjeta habilita la instalación de una variedad de sistemas operativos como Android, Ubuntu, Debian o versiones adaptadas de Linux como Xilinx el cual está basado en Ubuntu 12.04. Para experimentar con dicha funcionalidad se procedió a programar una memoria micro SD con el archivo de imagen de la distribución de Xilinx que se obtiene desde la página <http://xillybus.com/xillinux/> siguiendo el procedimiento encontrado en la guía de la página Xillybus (http://xillybus.com/downloads/doc/xillybus_getting_started_zynq.pdf). En la Figura 82 se muestra la pantalla del sistema operativo Xilinx en un monitor conectado por cable VGA a la tarjeta Zybo.

Contar con un sistema operativo habilita el uso de lenguajes de programación de alto nivel, en este trabajo se desarrolló una interface de usuario en Python con ayuda de la herramienta Tkinter, la interface desarrollada se muestra en la Figura 83.

La experimentación fue llevada a cabo realizando movimientos de los motores manualmente a partir de las dos entradas digitales del puente H L298, las cuales controlan el arranque y sentido de giro del motor, mientras que las salidas PWM del FPGA permiten ajustar la velocidad de giro. La alta frecuencia de muestreo de la FPGA permite que la lectura de los canales de los encoders se realice sin pérdida de información y se visualice en pantalla a intervalos tales que permitan al usuario consultar las posiciones de los ejes de manera clara. El ADC seleccionado permite la digitalización de hasta ocho canales y alcanzar resoluciones de 20 mV cuando se utiliza un voltaje de referencia de 5 volts, pero es posible utilizar un ADC con mejores prestaciones modificando el firmware del FPGA.



Figura 82. Xilinx instalado en la tarjeta Zybo.

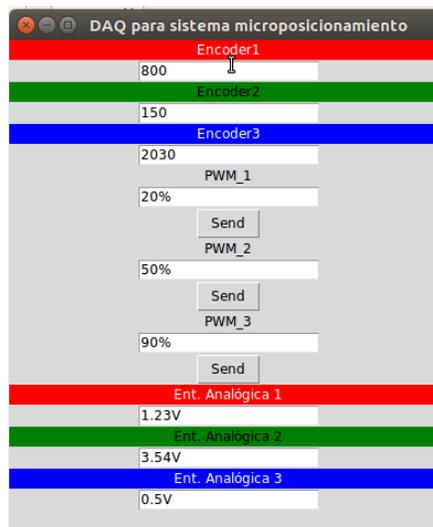


Figura 83. Interface de usuario para el sistema DAQ desarrollado en Python y Tkinter.

4. Conclusiones

La tecnología FPGA continua siendo una alternativa eficaz y versátil para desarrollo de sistemas digitales, donde sus ventajas se atribuyen a la alta velocidad, procesamiento paralelo y reconfigurabilidad, los cuales son muy eficientes para desarrollo de interfaces con distintos tipos de dispositivos electrónicos, así como para implementación de algoritmos de procesamiento complejos. Sin embargo, como desventaja se observa tiempos de desarrollo elevados, de tal forma que se complica el diseño de sistemas digitales que incluyan interfaces de comunicación y visualización de datos, por tal motivo es muy conveniente la combinación de la tecnología FPGA con microprocesadores, entre los que destacan aquellos con arquitectura ARM, ya que es un estándar que entre sus ventajas incluye bajo consumo de energía, eficiencia, portabilidad y reusabilidad del código.

Este enfoque ha sido adoptado por uno de los principales fabricantes de FPGA de la actualidad, quien ofrece un dispositivo que integra un FPGA y un microcontrolador ARM en el mismo encapsulado, asimismo incluye los buses necesarios para interconexión FPGA-ARM. Esta



combinación, resulta muy poderosa, sin embargo es una tecnología relativamente reciente que necesita ser explorada.

En este trabajo se presento el diseño de un sistema de adquisición de datos para un sistema de posicionamiento de tres ejes, el cual fue realizado en la tarjeta Zybo Zynq del fabricante DigilentInc, con especial énfasis en la etapa de diseño de los módulos de interface y describiendo la metodología para su implementación y validación en la plataforma. Observándose que el entorno de trabajo Vivado es amigable y ofrece las herramientas necesarias para el desarrollo de aplicaciones basadas en FPGA-ARM, como trabajo futuro se identifica la explotación de las herramientas de software y hardware asociadas al microprocesador ARM, de tal forma que se pueda habilitar el uso de interfaces de comunicación avanzadas, interfaces HMI, y distintas herramientas de software que permitan alcanzar un sistema de instrumentación y control completo para aplicaciones en sistemas de control de posición.

Referencias

- [1] S. Kumar, "Efficient Method for Controlling Electric Power by Automated Monitoring System using FPGA," 4th ICCCNT, pp. 4–7, 2013.
- [2] F. Aschauer, W. Stechele, and J. Treis, "FPGA Based Real-Time Data Processing DAQ System for the Mercury Imaging X-Ray Spectrometer," 2013 Euromicro Conf. Digit. Syst. Des., vol. 3, no. c, pp. 535–542, 2013.
- [3] E. Hassan, E. Mimouni, and M. Karim, "An FPGA-Based MPSoC for Real-Time ECG Analysis," pp. 5–8, 2015.
- [4] I. Jaziri, L. Chaarabi, and K. Jelassi, "A remote DC motor control using Embedded Linux and FPGA," no. Icmic, pp. 5–9, 2015.
- [5] M. Payak and S.R. Kumbhar, "FPGA Based PWM Control of Induction Motor Drive and its Parameter Estimation", Intl.Conf. on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATccT) 2015, pp. 631–635, 2015.
- [6] H. Mikhael and D. Habbi, "FPGA based Vector Control of PM Motor using Sliding Mode Observer," 2015.
- [7] Y. Y. Y. Yang and Q. F. Q. Fang, "The improved genetic algorithm for solving knapsack problem based on Handel-C," 2009 IEEE Int. Conf. Granul. Comput., 2009.
- [8] T. Zhu, J. Zhou, and S. Liu, "Design and implementation of JPEG2000 arithmetic decoder based on handel-C," 2009 3rd Int. Conf. Anti-counterfeiting, Secur. Identif. Commun. ASID 2009, no. Cd, 2009.
- [9] W. Farhat, H. Faiedh, and C. S. Member, "Embedded System for Road Sign Detection Using MicroBlaze," pp. 1–5, 2015.
- [10] T. Liu and Y. Wang, "IP design of universal multiple devices SPI interface," ASID 2011 - Proc. 2011 IEEE Int. Conf. Anti-Counterfeiting, Secur. Identif., no. 2010121060, pp. 169–172, 2011.
- [11] T. P. Blessington, B. B. Murthy, G. V Ganesh, V.- Dean, and C. Tech, "Uart-Spi Interface in Soc."
- [12] J. Jin and Q. Pang, "A novel acceleration estimation algorithm based on Kalman filter and adaptive windowing using low-resolution optical encoder," Proc. - 2014 IEEE Int. Conf. Control Sci. Syst. Eng. CCSSE 2014, pp. 185–189, 2015.
- [13] N. Johnson, K. J. Mohan, K. E. Janson, and J. Jose, "Optimization of incremental optical encoder pulse processing," Proc. - 2013 IEEE Int. Multi Conf. Autom. Comput. Control. Commun. Compress. Sensing, iMac4s 2013, no. 1, pp. 769–773, 2013.
- [14] A. De, K. Using, and R. V Jain, "Implementation of a PID control PWM Module on," no. Cmi, pp. 341–345, 2016.
- [15] René Romero Troncoso, "Electrónica Digital y Lógica Programable", Ed. Universidad de Guanajuato, 2007.



Deducciones significativas de dinámica de sistemas y mecánica vectorial

Figuroa Navarro Carlos

Universidad de Sonora, Ingeniería Industrial

Resumen

Se desarrollan en forma explícita y didáctica resultados importantes de la mecánica vectorial. El primer cálculo es un eslabón del proceso algebraico para obtener la aceleración en coordenadas polares, enseguida en movimiento curvilíneo es usual determinar el radio de la curvatura, por ejemplo, en el cálculo de la aceleración tangencial; aquí se explica la obtención de la fórmula. Por último en el modelo general de colisiones o impactos, la tarea consiste en la solución de un sistema de ecuaciones simultáneas, que produce las leyes de conservación de energía y movimiento, método útil también para entender el coeficiente de restitución. Los tres conocimientos son de uso común en mecánica vectorial, sin embargo, casi siempre se omite su esclarecimiento. Nuestro propósito es poner a disposición en ciencias e ingeniería, estas deducciones significativas, con objeto de mejorar lecciones y beneficiar el mejor entendimiento y atención de tales modelos a problemas de la mecatrónica.

Palabras clave: energía cinética, leyes de conservación, colisiones, radio de la curvatura.

1. Introducción

En los cursos de dinámica a nivel licenciatura los programas temáticos son de gran multiplicidad de contenidos, el temario incluye primeramente aceleración en coordenadas cartesianas, de igual forma la definición de componente tangencial y normal; cuestión crucial es la velocidad y aceleración angular, y luego se continúa en expresar la aceleración en coordenadas polares y cilíndricas. Enseguida se efectúan ejercicios con aplicaciones de la segunda ley de Newton, momentos, torcas y pares. El movimiento rotacional es significativo dado que es aplicable a mecanismos y máquinas. Se prosigue con la dilucidación de trabajo, energía, cantidad de movimiento y leyes de conservación. Luego se estudia dinámica de cuerpo rígido, velocidades relativas, mecanismos articulados y por último principio de D'Alembert. La cantidad de problemas y ejercicios es al menos un mil como lo constata los textos de la asignatura tales como el Beer [1], Bedford [2] y Hibbeler [3].

La abundancia de constructos deja poco tiempo para desarrollar y obtener mediante deducciones elementales ciertas formulas del curso. El desempeño se fortalece si cada tema es acompañado de una demostración de sus principales conceptos, en ese tenor es menester desarrollar alguna de ellas con aplicación de álgebra y cálculo diferencial. Del total de justificaciones, nosotros seleccionamos algunas de interés, tal como el desarrollo de la aceleración en coordenadas polares, la fórmula del radio de la curvatura, colisiones, impactos y el coeficiente de restitución.

Estos temas son relevantes en la investigación, por ejemplo M.F. Ferreira Da Silva [4] estudia impactos usando el significado geométrico del coeficiente de restitución, otro enfoque de interés es el de Aníbal O. García y José Pablo Cebreiro [5] quienes justifican un modelo dinámico debido a la variación de masa y movimiento que hay en un impacto. B.F. Voronin y G. Villalobos H [6], determinan el radio de la curvatura de la leva en un mecanismo plano. Por el lado de libros de consulta se tiene Weisstein [6] y R. Tenenbaum [7] útiles en la comprensión más integral de los conceptos.



Nuestra aportación es didáctica y responde a la excesiva cantidad de temas en el programa del curso, por tanto, se considera indispensable generar este tipo de materiales útiles en asignaturas relativas a ciencia e ingeniería. La idea es que un trabajo como el aquí propuesto es de carácter innovador al sintetizar derivaciones claves y conduce al diseño de lecciones auxiliares en los cursos de dinámica, material que ayuda a un estudio efectivo de la dinámica.

2. Aceleración en coordenadas polares

Para expresar vectores en coordenadas polares se define un vector unitario \hat{e}_r que apunta en dirección radial, de tal forma que se define el vector posición desde O hasta P

$$\vec{r} = r\hat{e}_r \quad (1)$$

La velocidad se obtiene derivando respecto al tiempo (1)

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{dr}{dt}\hat{e}_r + r\frac{d\hat{e}_r}{dt} \quad (2)$$

Cuando P se mueve a lo largo de una trayectoria curvilínea el vector unitario \hat{e}_r gira con velocidad angular

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

La derivada respecto al tiempo de \hat{e}_r se puede expresar en términos de \hat{e}_θ se puede enunciar como

$$\frac{d\hat{e}_r}{dt} = \frac{d\theta}{dt}\hat{e}_\theta \quad (4)$$

Sustituyendo este resultado en (2) se obtiene la velocidad del punto P además es posible sustituir la velocidad angular (3)

$$\vec{v} = \frac{dr}{dt}\hat{e}_r + r\frac{d\theta}{dt}\hat{e}_\theta = \frac{dr}{dt}\hat{e}_r + r\omega\hat{e}_\theta \quad (5)$$

Para demostrar la ecuación (4), y de acuerdo a la figura 1 se tiene

$$\hat{e}_r = \cos\theta\hat{i} + \text{sen}\theta\hat{j} \quad (6)$$

$$\hat{e}_\theta = -\text{sen}\theta\hat{i} + \cos\theta\hat{j} \quad (7)$$

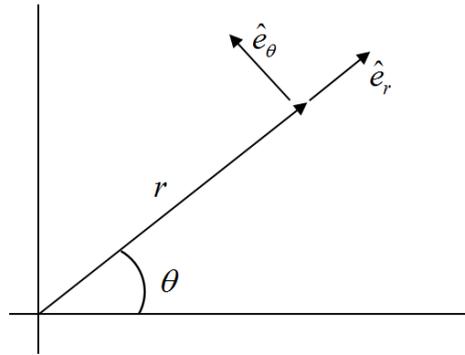


Figura 1. Vectores unitarios.

La relación entre \hat{e}_r y \hat{e}_θ , es que son perpendiculares $\hat{e}_r \cdot \hat{e}_\theta = 0$, únicamente se trata de derivar la relación (6)

$$\frac{d}{dt} \hat{e}_r = \frac{d}{dt} (\cos \theta_i + \text{sen} \theta_j) \quad (8)$$

$$\frac{d\hat{e}_r}{dt} = \left(-\text{sen} \theta_i \frac{d\theta}{dt} + \cos \theta_j \frac{d\theta}{dt} \right) \quad (9)$$

$$\frac{d\hat{e}_r}{dt} = \frac{d\theta}{dt} (-\text{sen} \theta_i + \cos \theta_j) \quad (10)$$

Donde se identifica el vector unitario (7)

$$\frac{d\hat{e}_r}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \hat{e}_\theta \quad (11)$$

Resultado deseado.

La aceleración se obtiene derivando la ecuación (5) respecto al tiempo

$$\bar{a} = \frac{d\bar{v}}{dt} = \frac{d}{dt} \left[\frac{dr}{dt} \hat{e}_r + r \frac{d\theta}{dt} \hat{e}_\theta \right] \quad (12)$$

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = \frac{d^2 r}{dt^2} \hat{e}_r + \frac{dr}{dt} \frac{d\hat{e}_r}{dt} + \frac{dr}{dt} \frac{d\theta}{dt} \hat{e}_\theta + r \frac{d^2 \theta}{dt^2} \hat{e}_\theta + r \frac{d\theta}{dt} \frac{d\hat{e}_\theta}{dt} \quad (13)$$

En el último termino se puede demostrar que

$$\frac{d\hat{e}_\theta}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} \hat{e}_r \quad (14)$$

en efecto al derivar la relación (7)



$$\frac{d}{dt} \hat{e}_\theta = \frac{d}{dt} (-\text{sen} \theta_i + \cos \theta_j) \quad (15)$$

Al derivar respecto al tiempo

$$\frac{d\hat{e}_\theta}{dt} = \left(-\cos \theta_i \frac{d\theta}{dt} - \text{sen} \theta_j \frac{d\theta}{dt} \right) \quad (16)$$

$$\frac{d\hat{e}_\theta}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} (\cos \theta_i + \text{sen} \theta_j) \quad (17)$$

$$\frac{d\hat{e}_\theta}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} \hat{e}_r \quad (18)$$

Se sustituye el resultado anterior en el vector aceleración (13) para generar en coordenadas polares el resultado

$$\bar{a} = \left[\frac{d^2 r}{dt^2} - r \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 \right] \hat{e}_r + \left[r \frac{d^2 \theta}{dt^2} + 2 \frac{dr}{dt} \frac{d\theta}{dt} \right] \hat{e}_\theta \quad (19)$$

3. Radio de la curvatura

La segunda fórmula a deducir es el radio de la curvatura, de uso común en dinámica, se sabe que para una curva $y = f(x)$, el radio de curvatura está dado por

$$\rho = \frac{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{3/2}}{\frac{d^2 y}{dx^2}} \quad (20)$$

Para obtener tal fórmula se usan ecuaciones paramétricas dadas por

$$\begin{aligned} x &= x(t) \\ y &= y(t) \end{aligned} \quad (21)$$

En términos de estas ecuaciones el radio de la curvatura está dado por

$$\rho = \frac{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{3/2}}{\dot{x}\ddot{y} - \ddot{x}y} \quad (22)$$

La figura 2 describe geoméricamente la interpretación de un radio de cualquier curva.

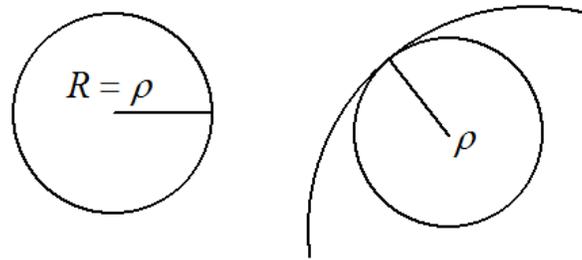


Figura 2. Radio de una curva.

En la siguiente figura 3 describe una curva $y = f(x)$

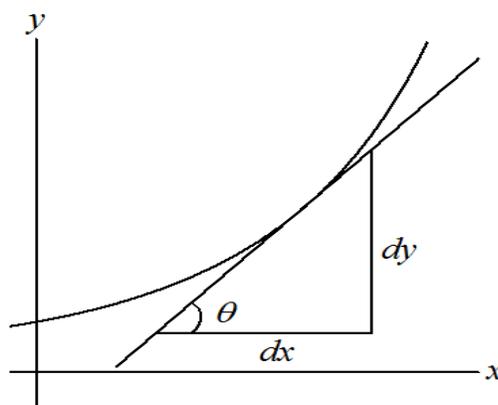


Figura 3. Recta tangente.

Asimismo, en la figura 3 se observa que para una curva cualquiera

$$\tan \theta = \frac{dy}{dx} = \frac{\dot{y}}{\dot{x}} \quad (23)$$

Recordando su derivada respectiva

$$\frac{d \tan \theta}{d\theta} = \sec^2 \theta \dot{\theta} \quad (24)$$

Al igualar ambas derivadas se tiene

$$\sec^2 \theta \dot{\theta} = \frac{\ddot{x}\dot{y} - \dot{x}\ddot{y}}{\dot{x}^2} \quad (25)$$

Haciendo uso de la identidad trigonométrica

$$1 + \tan^2 \theta = \sec^2 \theta \quad (26)$$

Se tiene ahora que



$$\left[1 + \tan^2 \theta\right] \dot{\theta} = \frac{\dot{x}\ddot{y} - \ddot{x}\dot{y}}{\dot{x}^2} \quad (27)$$

Que se reescribe como

$$\left[1 + \frac{\dot{y}^2}{\dot{x}^2}\right] \dot{\theta} = \frac{\dot{x}\ddot{y} - \ddot{x}\dot{y}}{\dot{x}^2} \quad (28)$$

De igual forma

$$\left[\frac{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}{\dot{x}^2}\right] \dot{\theta} = \frac{\dot{x}\ddot{y} - \ddot{x}\dot{y}}{\dot{x}^2} \quad (29)$$

$$\left[\dot{x}^2 + \dot{y}^2\right] \dot{\theta} = \dot{x}\ddot{y} - \ddot{x}\dot{y} \quad (30)$$

Se obtiene

$$\dot{\theta} = \frac{\dot{x}\ddot{y} - \ddot{x}\dot{y}}{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \quad (31)$$

Por otro lado, un diferencial de curva está dado por el teorema de Pitágoras según la figura 4 se tiene

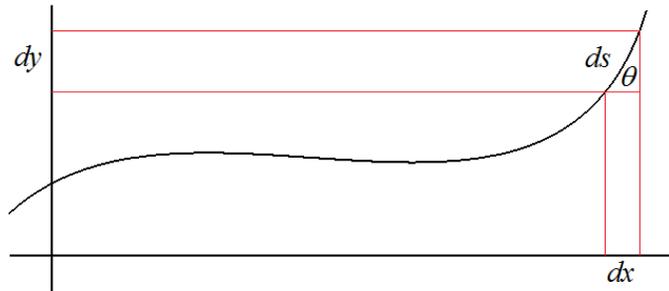


Figura 4. Longitud de arco.

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 \quad (32)$$

$$\dot{s}^2 = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \quad (33)$$

En coordenadas polares un diferencial de arco según la figura 5, está dado por

$$ds = \rho d\theta \quad (34)$$

$$\rho = \frac{ds}{d\theta} = \frac{\dot{s}}{\dot{\theta}} \quad (35)$$

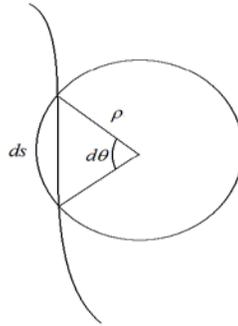


Figura 5. Longitud de arco.

Al sustituir (31) y (33) ambas ecuaciones en (35) se tiene

$$\rho = \frac{[\dot{x}^2 + \dot{y}^2]^{\frac{1}{2}}}{\frac{\dot{x}\ddot{y} - \ddot{x}y}{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \quad (36)$$

Con álgebra se genera el radio de la curvatura para ecuaciones paramétricas, ecuación (22)

$$\rho = \frac{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{3/2}}{\dot{x}\ddot{y} - \ddot{x}y} \quad (37)$$

La fórmula para una $f(x)$ está dada por la segunda derivada y haciendo explícita la derivada respecto del tiempo [8].

$$\frac{dy^2}{dx^2} = \frac{d}{dx} \left(\frac{dy}{dx} \right) = \frac{d}{dx} \left(\frac{\dot{y}}{\dot{x}} \right) \quad (38)$$

$$= \frac{d}{dx} \left(\frac{\dot{y}}{\dot{x}} \right) \left(\frac{dt}{dt} \right) \quad (39)$$

$$= \frac{d}{dx} \left(\frac{\dot{y}}{\dot{x}} \right) \left(\frac{1}{dt} \right) \left(\frac{1}{\dot{x}} \right) \quad (40)$$

En efecto si se tiene que $\frac{dx}{dt} = \dot{x}$ la ecuación (40) es correcta.

Derivando con la fórmula del cociente



$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \left(\frac{\ddot{x}y - \dot{x}\ddot{y}}{\dot{x}^2} \right) \left(\frac{1}{\dot{x}} \right) \quad (41)$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{\ddot{x}y - \dot{x}\ddot{y}}{\dot{x}^3} \quad (42)$$

Ahora de la fórmula para variables paramétricas ecuación (37) tal que se hace álgebra y se identifica la segunda derivada

$$\rho = \frac{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{3/2}}{\ddot{x}y - \dot{x}\ddot{y}} = \frac{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{3/2}}{(\dot{x})^3} = \frac{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{3/2}}{\frac{\ddot{x}y - \dot{x}\ddot{y}}{(\dot{x})^3}} \quad (43)$$

Se obtiene el radio de la curvatura

$$\rho = \frac{\left[1 + \left(\frac{\dot{y}}{\dot{x}} \right)^2 \right]^{3/2}}{\left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)} \quad (44)$$

4. Colisiones y coeficiente de restitución

A continuación, se presenta el tercer caso a demostrar en el tema de impactos, se inicia generando la fórmula para dos masas en movimiento antes del choque entonces suponer una colisión con velocidades iniciales diferentes y considerando velocidades primadas después del choque, la conservación de energía cinética y momento es

$$m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2 = m_1 v_1'^2 + m_2 v_2'^2 \quad (45)$$

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2' \quad (46)$$

Reescribiendo la ecuación (46) como

$$m_1 v_1 - m_1 v_1' = m_2 v_2' - m_2 v_2 \quad (47)$$

$$m_1 (v_1 - v_1') = m_2 (v_2' - v_2) \quad (48)$$

De igual forma se reescribe la conservación de energía, ecuación (45)

$$m_1 v_1^2 - m_1 v_1'^2 = m_2 v_2'^2 - m_2 v_2^2 \quad (49)$$



$$m_1(v_1^2 - v_1'^2) = m_2(v_2'^2 - v_2^2) \quad (50)$$

Se puede expresar ahora como

$$m_1(v_1 - v_1')(v_1 + v_1') = m_2(v_2' - v_2)(v_2' + v_2) \quad (51)$$

Aquí identificando en la ecuación (51) la expresión (48) resulta entonces que

$$v_1 + v_1' = v_2' + v_2 \quad (52)$$

$$v_1' = v_2' + v_2 - v_1 \quad (53)$$

Este resultado de la ecuación (53) sustituir en (46) para v_1'

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1(v_2' + v_2 - v_1) + m_2v_2' \quad (54)$$

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v_2' + m_1v_2 - m_1v_1 + m_2v_2' \quad (55)$$

$$m_1v_1 + m_2v_2 - m_1v_2 + m_1v_1 = v_2'(m_1 + m_2) \quad (56)$$

La velocidad de la masa dos después del choque es

$$v_2' = \frac{2m_1v_1 + m_2v_2 - m_1v_2}{m_1 + m_2} \quad (57)$$

$$v_2' = \frac{2m_1v_1}{m_1 + m_2} + \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2}v_2 \quad (58)$$

Si la masa dos está en reposo antes del choque la ecuación (58) ahora es

$$v_2' = \frac{2m_1v_1}{m_1 + m_2} \quad (59)$$

Por otro lado, de la misma forma para la masa uno se procede de la igual al despejar de (52) se tiene

$$v_2' = v_1' + v_1 - v_2 \quad (60)$$

Al sustituir esta expresión en la ecuación (46) se tiene

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v_1' + m_2(v_1' + v_1 - v_2) \quad (61)$$

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v_1' + m_2v_1' + m_2v_1 - m_2v_2 \quad (62)$$



$$m_1 v_1 + m_2 v_2 - m_2 v_1 + m_2 v_2 = v'_1 (m_1 + m_2) \quad (63)$$

$$v'_1 = \frac{2m_2 v_2 + v_1 (m_1 - m_2)}{m_1 + m_2} \quad (64)$$

Se tiene la velocidad de la masa uno después del choque

$$v'_1 = 2 \frac{m_2 v_2}{m_1 + m_2} + \frac{(m_1 - m_2)}{m_1 + m_2} v_1 \quad (65)$$

Si la masa uno inicialmente esta en reposo se tiene

$$v'_1 = 2 \frac{m_2 v_2}{m_1 + m_2} \quad (66)$$

Por último, se obtiene la fórmula del coeficiente de restitución para un caso ideal (perfectamente elástico) para dos masas m_1 y m_2 con velocidades v_{ai} antes del impacto, y v_{bi} después; aplicando conservación de la energía

$$\frac{1}{2} m_1 v_{a1}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{a2}^2 = \frac{1}{2} m_1 v_{b1}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{b2}^2 \quad (67)$$

$$m_1 v_{a1}^2 + m_2 v_{a2}^2 = m_1 v_{b1}^2 + m_2 v_{b2}^2 \quad (68)$$

$$m_1 v_{a1}^2 - m_1 v_{b1}^2 = m_2 v_{b2}^2 - m_2 v_{a2}^2 \quad (69)$$

$$m_1 (v_{a1}^2 - v_{b1}^2) = m_2 (v_{b2}^2 - v_{a2}^2) \quad (70)$$

También recurriendo a la conservación del movimiento

$$m_1 v_{a1} + m_2 v_{a2} = m_1 v_{b1} + m_2 v_{b2} \quad (71)$$

$$m_1 v_{a1} - m_1 v_{b1} = m_2 v_{b2} - m_2 v_{a2} \quad (72)$$

$$m_1 (v_{a1} - v_{b1}) = m_2 (v_{b2} - v_{a2}) \quad (73)$$

Dividiendo la ecuación (70) entre la (73) se obtiene

$$\frac{m_1 (v_{a1}^2 - v_{b1}^2)}{m_1 (v_{a1} - v_{b1})} = \frac{m_2 (v_{b2}^2 - v_{a2}^2)}{m_2 (v_{b2} - v_{a2})} \quad (74)$$



$$\frac{(v_{a1}^2 - v_{b1}^2)}{(v_{a1} - v_{b1})} = \frac{(v_{b2}^2 - v_{a2}^2)}{(v_{b2} - v_{a2})} \quad (75)$$

Al desarrollar la diferencia de cuadrados

$$\frac{(v_{a1} - v_{b1})(v_{a1} + v_{b1})}{(v_{a1} - v_{b1})} = \frac{(v_{b2} - v_{a2})(v_{b2} + v_{a2})}{(v_{b2} - v_{a2})} \quad (76)$$

Se obtiene

$$v_{a1} + v_{b1} = v_{b2} + v_{a2} \quad (77)$$

$$v_{b1} - v_{b2} = v_{a2} - v_{a1} \quad (78)$$

Entonces el coeficiente de restitución (e) se definió como la razón negativa de la velocidad relativa después del choque entre la velocidad relativa antes del choque

$$e = -\frac{v_{b1} - v_{b2}}{v_{a1} - v_{a2}} \quad (79)$$

al eliminar el signo menos queda entonces quedaría como:

$$e = \frac{v_{b2} - v_{b1}}{v_{a1} - v_{a2}} \quad (80)$$

El valor de (e) se encontrará entre 0 y 1, siendo totalmente elástico en 1 y totalmente inelástico en 0. El resultado es relativo a la conservación de la energía.

5. Aplicaciones a mecatrónica

Enseguida se desarrollan dos ejemplos donde esos modelos se utilizan,

a) En coordenadas polares para brazo robótico se tienen las ecuaciones polares siguientes

$$\begin{aligned} r &= 1 - 0.5 \cos(2\pi x) \\ \theta &= 0.5 - 0.2 \sin(2\pi x) \end{aligned} \quad (81)$$

Se pide calcular velocidad y aceleración, primero se obtienen las derivadas

$$\frac{d\theta}{dt} = -0.4\pi \sin(2\pi x) \quad (82)$$

$$\frac{dr}{dt} = \pi \sin(2\pi x) \quad (83)$$



El vector velocidad entonces es

$$\vec{v} = \pi \operatorname{sen}(2\pi x) \hat{e}_r + (1 - 0.5 \cos(2\pi x)) (-0.4\pi \cos(2\pi x)) \hat{e}_\theta \quad (84)$$

Evaluando

$$\vec{v} = -2.99 \hat{e}_r - 0.328 \hat{e}_\theta \quad (85)$$

Asimismo, la aceleración es determinada

$$\vec{a} = 5.97 \hat{e}_r - 4.0 \hat{e}_\theta \quad (86)$$

- b) Banda transportadora desplaza cajas con velocidad $0.2t \text{ m/s}^2$, sea el punto B en la curva a tres metros del inicio. Se desea calcular la aceleración en la curva punto B con radio de 2 metros.

$$a = \frac{dv}{dt} \quad v = \frac{ds}{dt} \quad (87)$$

$$\int_0^v dv = \int_0^t 0.2t dt \quad v = 0.1t \quad (88)$$

La distancia total es 6.42 metros, entonces

$$\int_0^{6.142} ds = \int_0^{t_B} 0.1t^2 dt \quad t_B = 5.69 \text{ seg}$$

La aceleración es

$$a_B = \frac{v_B^2}{\rho} = \frac{[(0.1)(5.69)^2]^2}{2} = 5.242 \text{ m/s} \quad (89)$$

6. Resultados

En la aceleración en coordenadas polares se obtienen las ecuaciones (4) y (11) que siempre en los cursos respectivos se obvia su resolución y es un eslabón crucial en el proceso de establecer el vector aceleración. En el radio de la curvatura es un cálculo que corresponde a una clase de diferenciales, se trata de unir los pasos necesarios en forma simplificada donde las combinaciones clave están en las ecuaciones (38) y (40). El punto quid en el desarrollo de la ecuación de velocidades después del impacto es la (50) y (52) que siempre crea dificultad resolver para estudiantes, por último, en el coeficiente de restitución hay otro método alternativo mediante integrales, aquí se usa las leyes conservación en consonancia al método de velocidades visto aquí mismo. Se observa que con argumentos mínimos se pueden explicar conceptos importantes de la dinámica de cuerpos. Se presentan dos ejercicios relacionados a mecanismos en las ecuaciones (81) a (89).



7. Conclusiones

Este tipo de trabajo pueden ser valiosos para ayudar a comprender en forma cabal los conceptos de la dinámica vectorial. La primera conclusión es que es significativa la relación con cálculo diferencial e integral; por ejemplo, la aceleración en coordenadas polares siempre constituye un problema su proceso de aprendizaje, esto quizá debido a que no hay bases sólidas para conocer la raíz del modelo. El radio de la curvatura es un estudio de curvas planas, es menester conocer rectas tangenciales y normales a una curva para una deducción más precisa. Tal deducción debe estudiarse a detalle en los cursos anteriores a dinámica, aunque la solución aquí expuesta es una justificación suficiente. La segunda conclusión es en el tema de colisiones y coeficiente de restitución, muy relacionado a las leyes de conservación de energía y movimiento, pero requiere habilidades mínimas de álgebra lineal, este otro curso que sirve de base a la dinámica. Por último, es necesario mencionar otros cálculos que deben efectuarse en el recorrido, tales como la fuerza en términos de la derivada de un potencial, cálculos de momentos de inercia, segunda ley de Newton con la conservación de movimiento, ángulos de Euler, principio de D'Alembert. Todo puede ser material para diseñar lecciones del tipo aquí propuesto.

Referencias

- [1] Beer F. y Johnston E.R., *Mecánica Vectorial para Ingeniería, Dinámica*, Edit. McGraw Hill, México, sexta edición, pp. 794-796(1998).
- [2] Bedford A. y Fowler W., *Mecánica para Ingeniería, Dinámica*, Edit. Pearson Prentice Hall, México, 5ta. edición, pp. 68-70. (2008).
- [3] Hibbeler R.C., *Ingeniería Mecánica*, decima segunda edición, Prentice Hall, pp. 68-70, México. (2010).
- [4] Ferreira Da Silva M.F., *Revista Mexicana de Física*, 54 (1), pp. 65-74. (2008).
- [5] García A. O. y Cebreiro J.P., *Modelo Dinámico de colisión*, Congreso Iberoamericano de Accidentología Vial, Argentina. (2008).
- [6] Voronin B.F. y Villalobos G. *Determinación del radio de la curvatura de la leva de un mecanismo plano*, *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 14 1, pp. 15-25. (2010).
- [7] Weisstein E. W., Edit. Mathworld Wolfram *Research...*
- [8] McAloon K. y Tromba A., *Cálculo*, Edit. PCSA, México, primera edición, pp. 258-259. (1976).

Ingeniería Mecatrónica en México 2016

Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.
Prolongación Corregidora Norte No. 168, interior E
Col. El Cerrito, C.P. 76160, Querétaro, Qro.
Se tiraron 1000 ejemplares, en formato digital pdf, tipo CD,
Tamaño: 20 Mb.

ISBN: 978-607-9394-07-3

Las opiniones expresadas por los autores de los capítulos del libro no reflejan la postura de la Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C. La información presentada en cada capítulo es responsabilidad de los autores de cada capítulo. El libro es una publicación de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la Asociación Mexicana de Mecatrónica A. C., la cual permite el uso, distribución y reproducción sin restricciones por cualquier medio, siempre y cuando los trabajos estén apropiadamente citados, respetando la autoría de las personas que realizaron los capítulos.

Sobre los autores

Juan Manuel Arreguín

Doctorado en Ciencias y Tecnología con especialidad en Mecatrónica (2008), Maestría en Ingeniería Eléctrica en la Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica (FIMEE). Ingeniero en Electrónica egresado de la FIMEE. Actualmente adscrito como profesor titular de tiempo completo en la Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería. Investigador Nacional Nivel 1 del CONACYT. Sus áreas de investigación comprenden diseño y desarrollo de sistemas embebidos y manipuladores neumáticos.

José Emilio Vargas Soto

Posdoctorado por la Universidad de Telecomunicaciones de Tokio, Japón. Doctorado en Ciencias Físicas con especialidad en Informática y Automática por la Universidad Complutense de Madrid, Maestría en Tecnologías de la Información en Fabricación por la Universidad Politécnica de Madrid, Licenciatura en Ingeniería Mecánica y Eléctrica por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Actualmente adscrito como profesor titular de tiempo completo en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro. Senior member IEEE, fundador de la Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., Investigador Nacional Nivel 1 del CONACYT. Sus áreas de investigación son en torno al desarrollo y control de máquinas mecatrónicas.

Saúl Tovar Arriaga

Doctorado en Ciencias Biomédicas por el Institute Of Medical Physics, Friedrich-Alexander-University, Alemania (2009). Maestría en Ciencias de la Mecatrónica en Siegen Universität, Alemania. Licenciatura en Ingeniería Electrónica por el Instituto Tecnológico de Querétaro. Representante del cuerpo académico en Informática Aplicada. Profesor Titular de Tiempo Completo en la Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Informática. Investigador Nacional Nivel 1 del CONACYT, Profesor perfil PRODEP. Experiencia docente: 8 años.

ISBN: 978-607-9394-07-3



9 786079 394073