DESARROLLO DE SOFTWARE Y HARDWARE EN MECATRÓNICA

Juan Manuel Ramos Arreguín
José Emilio Vargas Soto
Marco Antonio Aceves Fernández
Jesús Carlos Pedraza Ortega
Efrén Gorrostieta Hurtado

ASOCIACION MEXICANA DE MECATRONICA A.C.

DESARROLLO DE SOFTWARE Y HARDWARE EN MECATRÓNICA

Juan Manuel Ramos Arreguín
José Emilio Vargas Soto
Marco Antonio Aceves Fernández
Jesús Carlos Pedraza Ortega
y Efrén Gorrostieta Hurtado

ISBN: 978-607-9394-04-2

® Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.
Primera edición.
México, Octubre 2015

PROLOGO

La Asociación Mexicana de Mecatrónica, desde su creación el 19 de Octubre del 2001, se ha enfocado principalmente a impulsar el conocimiento del área de mecatrónica a nivel licenciatura, así como al desarrollo de sistemas mecatrónicos. Con el tiempo, la Asociación ha ido cambiando, y busca adaptarse a los cambios que se generan en México y a nivel mundial. Para esto, es necesario impulsar el trabajo multidisciplinario en el desarrollo de proyectos mecatrónicos.

Tradicionalmente, la mayoría de las personas visualiza la mecatrónica como una combinación de mecánica y electrónica. Sin embargo, la mecatrónica ha estado ligada a las tecnologías de la información de una manera directa o indirecta, ya sea para almacenar bases de datos de diversos sistemas, para realizar cálculos matemáticos en el análisis de un sistema mecatrónico, programación de interfaces de usuario e incluso el desarrollo de software especializado para el diseño y análisis de estructuras mecánicas y electrónicas.

A nivel mundial, las tecnologías de la información han cobrado cada vez una mayor importancia en el desarrollo de aplicaciones relacionadas con la mecatrónica, como es el desarrollo de electrodomésticos, teléfonos inteligentes, tabletas, automóviles, equipos de audio y video, entre muchos otros.

Es por lo anterior, que los lectores podrán encontrar en este libro el desarrollo de proyectos que involucran mecánica, electrónica y tecnologías de la información, en forma conjunta o individual, como un esfuerzo para que las instituciones educativas vean en las tecnologías de la información una gran oportunidad para el desarrollo de sus estudiantes, debido a que esta área se perfila como la que mayor oportunidad laboral tiene actualmente, a existir una alta demanda de desarrolladores de software, con la capacidad especial de poder interactuar una aplicación con el hardware, tanto electrónico como mecánico.

La información que este libro presenta, es un esfuerzo extraordinario por parte de todos los autores, para dar a conocer el trabajo que están desarrollando en sus diversas instituciones, tanto educativas como de

investigación y desarrollo tecnológico. Los estudiantes de licenciatura podrán apreciar que pueden desarrollar trabajos de alta calidad, y que no necesariamente deben ser trabajos de tesis.

Finalmente, la Asociación Mexicana de Mecatrónica desea que el contenido del libro sea de ayuda para que el lector amplíe el panorama de los alcances de la mecatrónica, y para que estudiantes relacionados con las tecnologías de la información se animen a trabajar en el desarrollo de software aplicado a sistemas multidisciplinarios, ampliando de esta manera su campo de trabajo al saber desarrollar aplicaciones capaces de comunicarse con sistemas digitales.

Dr. Juan Manuel Ramos Arreguín
Presidente de la Asociación Mexicana de Mecatrónica
Profesor de Tiempo Completo
Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Informática

ÍNDICE

1 Diseño de una Servoválvula para turbina COPPUS 1
Mancilla Alonso Humberto, Vázquez Cervantes Jorge, Velázquez Garibay Rogelio Alberto

2 Diseño e implementación de un Sistema de Control basado en Visión para manipular un Robot de 2 g.d.l. 12
Trejo Rugerio Uriel, Méndez Zapata Elías, Hernández Zempoaltecatl Rodrigo, Cano Corona Ariana

3 Control de un robot cartesiano por medio de Matlab para su uso como impresora 3D 21
Jorge Gudiño Lau, Aguilar Castillo Rodolfo Benjamín, Covarrubias Contreras Ángel Alí, Palafox Rico Gerardo Javier, Rodríguez García Oscar Alejandro

4 Diseño y construcción de control de servo válvulas para turbina Coppus 30
Humberto Mancilla Alonso, Jorge Vázquez Cervantes, Millán Rosas César

5 Instrumentación Virtual, Supervisión a distancia y Control para una planta Generadora de Energía 38
Mancilla Alonso Humberto, Carbajal Álvarez Gerardo, Vázquez Cervantes Jorge

6 Diseño Virtual de un Robot Paralelo tipo Delta 50
Mancilla Alonso Humberto, Macedo Chagolla Fernando, Alcántara Medina Luis

7 Diseño de mecanismo para seguimiento de trayectoria de tobillo en rehabilitación de marcha 61
Calva Yáñez Maria Bárbara, Calderón Romero Fernando, Portilla Flores Edgar Alfredo, Niño Suarez Paola Andrea, Vega Alvarado Eduardo

8 Desarrollo e implementación de Instrumentos Virtuales para un equipo de pruebas biaxiales 69
Hernández Cruz Noé, Lozano Guzmán Alejandro A., Morales Sánchez Eduardo, Moreno Guzmán Martín

9 Diseño conceptual de mecanismos a implementar en un simulador mecánico para probar prótesis articulares de rodilla 75
Escobar Medina J.A., Aguirre Nájera A.E., Barceinas Sánchez J.D.O., Álvarez Vera M., García García A.L.

10 Desarrollo de un simulador mecánico para probar prótesis articulares de rodilla aplicando la metodología del Modelo W 83
Aguirre Nájera Adán Enrique, Escobar Medina José Ángel, Barceinas Sánchez José Dolores Oscar, García García Adran Luis, Domínguez López Iván

11 Automatización de equipo para pruebas de erosión por impacto de partículas sólidas mediante un controlador lógico programable 92
Gómez Pérez Víctor Alfonzo, Aguirre Nájera Adán Enrique, Escobar Medina José Angel, Barceinas Sánchez José Dolores Oscar, Domínguez López Ivan

12 Convertidor ca-cc del tipo reductor-elevador en cascada para un inversor de un motor sin escobillas 100
Moreno Guzmán Martin, Hernández Zavala Antonio, Hernández Cruz Noé

13 Diseño Mecatrónico de un Robot de Tres Grados de Libertad Aplicando la Metodología de Nigel Cross 106
Morgado González Irving, Xicoténcatl Pérez Juan Manuel, Ordaz Oliver Jesús Patricio, Flores Isidro Anylí

14 Teleoperación con dispositivos hápticos 122
Jorge Gudiño Lau, Palafox Rodríguez Joel, Santiago Hernández Eugenio, Felipe Ríos Cortez, Saida Charre Ibarra

15 Implementación de la cinemática de movimientos secuenciales en rodilla automatizada 134
Rangel D., Suárez C., Chagolla H., Olvera A., Estévez M.

16 Modelo matemático para determinar el factor de concentración de esfuerzos en una placa plana con filete y barreno 145
Ortega Herrera Francisco Javier, Garcia Salazar Diego Armando, Rodriguez Moreno Rafael Alejandro, Garcia Guzman Jose Miguel y Tapia Tinoco Guillermo

17 Manipulación de una válvula de control de manera remota 155
Delgado Arcega Rodrigo Oliver, Gómez Becerra Fabio Abel, Robles Julio Cesar

18 Propuesta de diseño simple de la estructura y las articulaciones para un exoesqueleto de miembro inferior de uso continuo. Caso de sustitución por enfermedad 176
Rodríguez Martínez Rafael, López Amaya Julio Alberto, Urriolagoitia Sosa Guillermo, Sánchez Martínez Ignacio, Romero Ángeles Beatriz

19 Determinación del Grado de movimiento de una persona en estados afectivos 183
Romero Herrera Rodolfo, Rosas Saavedra Martha, Domínguez Martínez Yolanda

20 Diseño e implementación de un sistema de instrumentación para el monitoreo estructural del Acueducto de Querétaro 195
Hernández Figueroa Jorge Alberto, Crespo Sánchez Saúl Enrique, Quintana Rodríguez Juan Antonio, Martínez Álvaro Luis, Gasca Zamora Héctor

21 Reingeniería de un cuadricoptero 207
Flores Ceja Guillermo, Solorio Mejía Marcela Yunuen, Alcalá Janeth, Charre Saida, Durán Miguel

22 Robot de dos grados de libertad aplicado a la rehabilitación del brazo 220
Castañeda Villafaña Joanna Iridiana, Charre Ibarra Saida Miriam, Jorge Gudiño Lau, Martínez Olmedo Lamberto Gastón, Sánchez Díaz José Francisco

23 Controlador Difuso para el Novint Falcon 232
Mendoza Villegas Fernando de Jesús, Trujillo Cárdenas Xavier, Charre Ibarra Saida Miriam, Gudiño Lau Jorge, Alcalá Rodríguez Janeth Aurelia

24 Prototipo de automatización industrial, llenado y tapado de cajas 241
Méndez Guzmán Hugo Antonio, Ledesma Silva Gabriel Daniel, Sierra Martínez Carlos, Hernández Rangel Omar Alexis, Sánchez Rocha José Manuel

25 Sistema de visión para reconocimiento y búsqueda de formas aplicado a robots móviles 253
Méndez Guzmán Hugo Antonio, Flores Muñoz Víctor Hugo, Ramírez Arrona Sergio Antonio, Luna Padilla Noe, Soria Rodríguez Oscar

26 Visual Control - Automatización de un sistema de envasado utilizando un sistema de visión 261
Méndez Guzmán Hugo Antonio, Carrillo Delgado Cesar Paul, Rodríguez Álvarez Rubén Darío de la Cruz, López Arredondo Ana Luisa, Fuentes Arias Ezequiel

27 Multi-Concentrador Térmico de Tubo Parabólico Controlado con Lógica Difusa 273
Ozuna Huerta Jesús Gustavo, Wozniak Marek, Gómez Palomares Jesús Leonel, Lugo Cóporo Marcos Raúl

28 Control de Posición Hiperbólico de Robots Manipuladores 279
Ortiz Ortiz Tania J., Ramos Arroyo Oscar, Cid Monjaraz Jaime, Limón Díaz Miguel A, Reyes Cortés Fernando

29 Técnicas aplicadas de realidad virtual y realidad aumentada para el fomento de la biodiversidad de áreas naturales protegidas de Querétaro 289
Pérez López Luis Alberto, Flores Muñoz Carlos, Tovar Arriaga Saúl, Sánchez Ramos Marco Antonio, Ayala Martínez Irving Jesús, Sagaz Olvera Marco Antonio

30 Diseño Instruccional para la enseñanza de la programación de computadoras a estudiantes de Ingeniería Mecatrónica de la UES 296
Curiel Aguirre Fernando, Jiménez López Eusebio, Santiago Sandoval Martha Lorena, González Gutiérrez Luz María, Olmos Lomas Valeriano

31 Embotelladora Automatizada por medio de PLC 306
Méndez Guzmán Hugo Antonio, Alvizo García José de Jesús, Bonilla Anguiano Cristo Manuel, Rangel Gamiño Juan, Roaro Moreno Josué Francisco

32 Generación de movimientos del torso de un robot humanoide de arquitectura abierta. 316
González Trejo José Enrique, López Sandoval Andrés Ernesto, Baliño González Rosa Isela, Rodríguez González Andrea Jaqueline, Reyes Cruz Luis Ángel, Pedraza Ortega Jesús Carlos

33 Control de un motor trifásico para aplicaciones industriales vía Wi-fi 325
López Carrasco Miguel Ángel, Pérez Leal Antonio Javier, Ramos Aviña Irving Fabián, Aguilar Anastacio José Carlos A

34 Un algoritmo genético con distribución caótica 337
García Mejía Juan Fernando, Torres Reyes Carlos Eduardo, García Mejía José Antonio

35 **Diseño y Construcción de un Prototipo de Robot Educativo para Apoyo de la Enseñanza de los Números a Nivel Preescolar** 343
Elmar Montiel Jiménez, Guillermo Córdova Morales, Fidel Paredes Xochihua, Juan Ramón Campos Peña

36 **Aprendizaje basado en proyectos: un ejemplo de aplicación en matemáticas y mecatrónica** 352
Jiménez López Eusebio, Servín de la Mora Pulido Daniel, Luna Sandoval Gabriel, Villalba Eúan Alejandro Iván, Curiel Aguirre Fernando

37 **Diseño de control de velocidad con realimentación de estados para turbina de planta solar** 362
Hernández Gutiérrez Alicia, Toledano Ayala Manuel

38 **Controlador difuso auto-sintonizado para cojinete magnético de un grado de libertad** 372
Santana Ramírez José de Jesús, Jáuregui Correa Juan Carlos

39 **Diseño y Construcción de una Mano Robótica para el Proceso de Enseñanza – Aprendizaje de la Mecatrónica** 382
Cruz Ramírez S. Rolando, Tapia Rodríguez Fidencio

40 **Instalación y control de sistema háptico Novint Falcon con Matlab** 389
Miguel Durán Fonseca, Jorge Gudiño Lau, Mauricio López Ramos, Saida Charre Ibarra y Janeth Alcalá Rodríguez

41 **Separador de Botellas de Vidrio por color Utilizando un Microcontrolador PIC18F26K22** 400
Lugo Marcos, Díaz Ever, Gómez Leonel, Ozuna Gustavo

42 **Diseño e implementación de un sistema de rehabilitación para los dedos de la mano.** 405
Pérez Cárdenas Diego, Charre Ibarra Saida Miriam, Jorge Gudiño Lau, Osorio Alcalá Edgar Fabián, Macías Elizondo Aldo

43 **Programación de un autómata para una Prensa Hidráulica para block de sal.** 416
Martínez Martínez Verónica, Rodríguez Lemus Rubén, Vivanco López José Edgardo, Juarez Valenzuela Mónica Del Carmen, Cervantes Díaz Martha

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

1. Diseño de una Servoválvula para turbina COPPUS

Mancilla Alonso Humberto, Vázquez Cervantes Jorge, Velázquez Garibay Rogelio Alberto

humberto_6@hotmail.com

Facultad de Estudios Superiores Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México.
Av. Rancho Seco s/n, Col. Impulsora, Nezahualcóyotl, Estado de México, C. P. 57130, México.

Resumen

Las servoválvulas son dispositivos electromecánicos que permiten el control remoto y/o automático de procesos por medio del bloqueo o regulación de fluidos que circulan en un sistema.

Este artículo nos muestra el proceso de diseño mecánico de una servoválvula que permite regular el flujo de vapor entrante a una turbina COPPUS que forma parte del ciclo Rankine en el laboratorio de máquinas térmicas de la FES Aragón. Este proyecto surge como una manera eficaz y económica de complementar el sistema instalado de supervisión y adquisición de datos en el ciclo Rankine, para no solo monitorear el proceso sino poder manipularlo a distancia y así ofrecer prácticas de laboratorio de mejor calidad. Para el diseñó de este mecanismo se analizaron válvulas automáticas y manuales similares para el desarrollo de un concepto funcional y se fabricó el prototipo que fue sometido a distintas pruebas de funcionamiento.

Palabras clave: Diseño, Control, Servoválvula, Manufactura.

1. Introducción

El presente trabajo muestra el desarrollo del proyecto de la tesis con el mismo nombre [1] el cual tuvo como objetivo el diseño de un actuador que cumpliera los requerimientos necesarios para la regulación del vapor de una turbina COPPUS RLA que forma parte de un ciclo Rankine con el cual se realizan prácticas de laboratorio en las que se observan los procesos termodinámicos pertinentes para la generación de electricidad.

El diseño en ingeniería se puede definir como el proceso de aplicar las diversas técnicas y principios científicos con el propósito de definir un dispositivo, un proceso o un sistema con suficientes detalles que permitan su realización. El diseño puede ser simple o muy complejo, fácil o difícil, matemático o no matemático puede implicar un problema trivial o uno de gran importancia. No obstante, la complejidad de la materia por lo general requiere que el diseñador disponga de un conjunto de problemas estructurados paso a paso ideados para esclarecer un concepto o conceptos particulares relacionados con el tema particular. Es por ello que el presente artículo se basa en el uso del método de diseño de Pahl y Beitz.

Los siguientes puntos de este mismo apartado nos explican la justificación para la elaboración del diseño y el encuadre al tema en general. El siguiente apartado describe la concepción del producto desde el diseño conceptual hasta la fabricación y el último apartado informa los resultados obtenidos en las pruebas de funcionamiento realizadas al dispositivo final.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

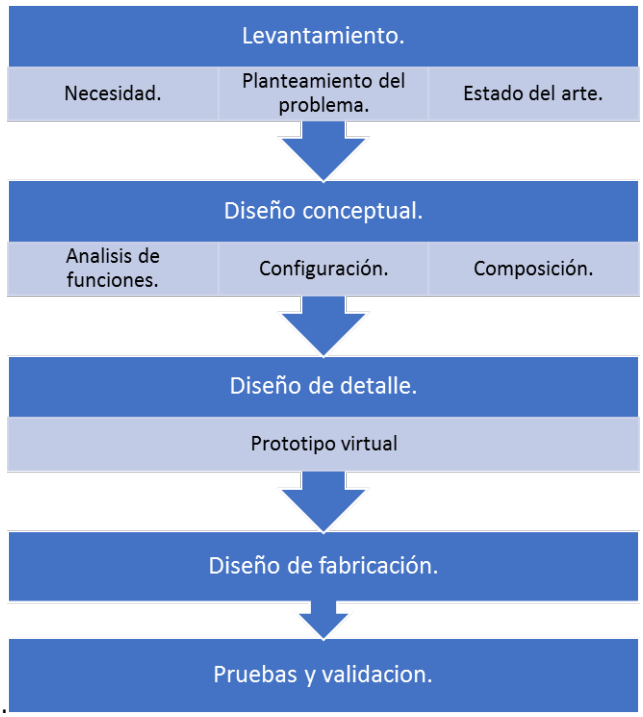


Figura 0. Diagrama de Metodología

1.1. Necesidad

La FES Aragón [2] cuenta con los equipos para proporcionar las prácticas correspondientes a la generación termoeléctrica por medio de un ciclo Rankine:

- Bomba
- Caldera y Sobrecalentador.
- Turbina
- Condensador

En la actualidad el desarrollo de dichas prácticas suele ser muy convencional, es el caso de tomar notas en un cuaderno, maniobrar los equipos directamente, realizar lecturas con instrumentos como cronómetros manuales, termómetros de mercurio entre otros. Dichas acciones restan eficiencia a las prácticas ya que el alumno suele distraerse e incluso podrían someterlos a situaciones inseguras, por lo que se da la necesidad de actualizar los equipos con los que cuentan nuestros laboratorios.

Las alternativas para mejorar el sistema son muy amplias y podrían derivarse en modificación, mejora o sustitución de algunos elementos del ciclo con lo que se puede automatizar el proceso para mejorar e incrementar la infraestructura del laboratorio. Este es el caso de la turbina de vapor, cuya operación es completamente manual y su funcionamiento es esencial para la enseñanza de la generación eléctrica

La turbina con la que se cuenta en el Laboratorio de Maquinas Térmicas, es una COPPUS RLA de una sola etapa que funciona con vapor sobrecalentado, comúnmente se utilizan para bombas de aceite lubricante, bombas de agua de alimentación, ventiladores y generadores para aplicaciones de 1HP a 1000HP. En este caso la turbina esta acoplada a un generador de Corriente Continua, la turbina gira su eje que esta acoplado al del generador gracias al vapor que fluye por sus alabes, este vapor es proporcionado por el generador de vapor mediante un sistema de tubería y el flujo de este hacia el rotor es regulado por 4 válvulas manuales permitiendo un funcionamiento flexible y el aumento de la eficiencia a carga parcial.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

La sustitución de estas válvulas manuales por unas automáticas aunadas al sistema de adquisición y supervisión de datos [3] nos permitiría establecer un control en la generación de CC de salida dependiendo de la potencia eléctrica requerida actualizando así el funcionamiento de la turbina.

La carencia del material de laboratorio idóneo se debe principalmente a los altos costos que tienen en el mercado y la escases de equipos que tengan la escala adecuada para realizar demostraciones a nivel educativo que sean claras, lúdicas y comprensible.

El empleo de dichas válvulas automáticas presentaría ciertos problemas ya que actualmente en el mercado tienen un costo demasiado elevado para el presupuesto con el que cuenta el laboratorio, los precios oscilan entre los $50,000 hasta los $170,000 dependiendo del tamaño, marca, calidad y mecanismo, precio que solo incluye la válvula ya que la etapa de control debe de ser específica para el tipo y modelo de la válvula y cuyo costo es adicional al de esta por otro lado la construcción de su cuerpo no es compatible con la turbina por lo que de utilizarse estas válvulas existentes en el mercado habría que hacer un gasto adicional en realizar una adaptación. Por lo que se requiere del diseño de una válvula con un costo accesible, que sea compatible y realice la función de regulación automática.

1.2. Estado del arte

Para el control automático de los procesos industriales las válvulas de control tienen un rol prioritario en el bucle de regulación, puesto que tienen la función de variar el caudal del fluido de trabajo el cual modifica el valor de la variable medida comportándose como un orificio de área efectiva continuamente cambiante. Estos mecanismos tienen tanta importancia como el elemento sensor, el transmisor o el controlador y generalmente constituyen el último elemento en un lazo de control instalado en un sistema.

Las electroválvulas distribuidoras son mecanismos accionados por un solenoide donde la dirección y la magnitud del caudal que atraviesa la válvula se permite o se interrumpe excitando o no los solenoides. Son accionadas mediante una amplia gama de tensiones de suministro de CC o de CA, y pueden ser accionadas por interruptores de estado sólido o por relevadores eléctricos sencillos. La velocidad de reacción depende del tamaño de la válvula y la potencia del solenoide, los cuales tienen amplia variedad en el mercado dependiendo de la aplicación.

Estas válvulas son solo de dos o tres posiciones por lo que no suministran un control de caudal preciso o proporcional y generalmente solo se utilizan para servicios de apertura total o cierre total sin estrangulación en el caso de dos vías y para servicios de desviación de caudal en el caso de tres vías.

Las válvulas proporcionales son dispositivos que difieren de las electroválvulas en que es posible controlar la posición del elemento móvil dentro del cuerpo de la válvula, ya que son accionadas por medio de un solenoide de corriente variable que en su forma más sencilla se consigue suministrando una tensión variable a la bobina del solenoide mediante un potenciómetro. Esta propiedad nos da como resultado un control eléctrico del caudal que pasa por la válvula.

Normalmente, la válvula puede utilizarse conjuntamente con un amplificador de control que evita los problemas resultantes de la generación eléctrica de calor, las tolerancias de la resistencia de la bobina y las variaciones de la tensión de un suministro, lo que provee las características y ajustes necesarios para optimizar el control.

Dichos dispositivos pueden o no contar con retroalimentación, esto depende de la aplicación ya que se utilizan frecuentemente para regulación donde es aceptable la resistencia a la circulación y no es tan indispensable una señal de retroalimentación. La mayoría de las aplicaciones son en sistemas de cadena abierta o cadena cerrada discontinua en las que se utilizan con interruptores sencillos de posición o de proximidad y para los pocos casos de cadena cerrada suele sustituirse o complementarse estos elementos con un transductor lineal o giratorio para generar la señal de realimentación. Físicamente son muy robustas en comparación a la línea del fluido de trabajo.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Suele denominarse como servoválvula a las válvulas accionadas por un servomotor el cual mediante el mecanismo del cuerpo de la válvula aprovecha el movimiento giratorio del motor para variar la posición de su elemento móvil, teniendo así la posibilidad de regular el caudal del fluido de trabajo.

Las servoválvulas han sido la selección automática para la mayoría de los sistemas de control de cadena cerrada (excepto para los más simples donde comúnmente se utilizan las válvulas proporcionales mencionadas anteriormente) ya que el uso de motores eléctricos que son alimentados por una amplia gama de tensiones de CC provee a estos dispositivos de una mayor precisión en equipos de escala pequeña y en general de un tiempo de respuesta inferior en comparación con las demás válvulas automáticas, además de que la señal de retroalimentación puede ser obtenida por diferentes tipos de transductores ya sea lineales o rotativos.

1.3. Descripción

El presente es un proyecto cuya finalidad versa en el diseñó mecánico de una servoválvula para la regulación del flujo de vapor de una turbina, dicha válvula fue fabricada conforme a los requerimientos necesarios para la operación del sistema.

Basados en las válvulas manuales con las que cuenta la turbina actualmente y en válvulas automáticas que son utilizados en procesos similares, se realizó un dispositivo mecánico que es activado por un motor capaz de ser activado por un circuito de control diseñado específicamente para la servoválvula y que es compatible con la interfaz de supervisión y adquisición de datos con las que cuenta el ciclo Rankine instalado.

2. Desarrollo del proyecto

La realización del diseño demanda ciertos requerimientos a cumplir para satisfacer las necesidades del sistema los cuales se desglosan en la siguiente tabla:

Tabla 1 Requerimientos de diseño.

Requerimientos	Descripción
De Uso	• Practicidad • Seguridad • Mantenimiento • Reparación
De Función	• Mecanismos • Confiabilidad • Resistencia • Acabados
Estructurales	• Número de componentes • Carcasa • Unión
Técnico – Productivos	• Bienes de capital • Modo de producción • Normalización • Materias primas • Prefabricación • Tolerancias • Costo de producción

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

2.1. Diseño conceptual.

Con base en los requerimientos de diseño se realiza la siguiente descomposición de funciones (Figura 1) que nos permitirá conocer las labores que el dispositivo debe de realizar partiendo desde el objetivo general a los particulares y así dividir las tareas en distintos elementos.

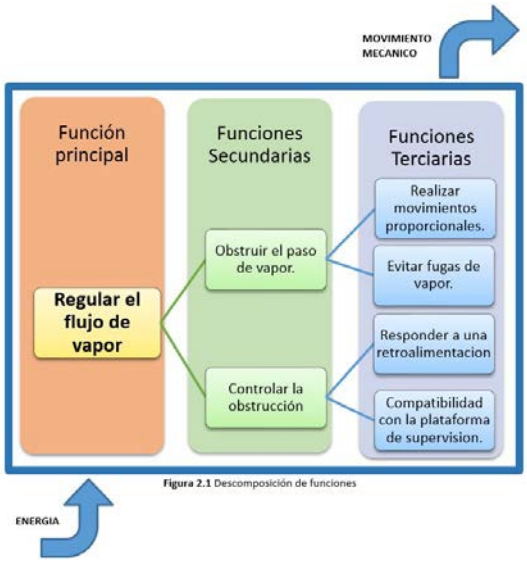
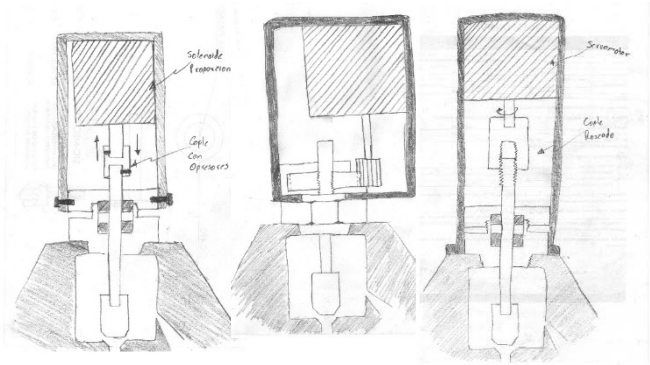


Figura 1. Descomposición de funciones.

El nuevo diseño se desarrolló tomando como base la válvula manual original, para ser lo menos invasivo en el sistema de la turbina además se pensó en un producto de fácil maquinado, bajo presupuesto y ensamble simple con herramienta comercial.

Conservando algunos elementos necesarios para la compatibilidad de la turbina los cuales fueron la forma y tamaño del obturador así como la conexión roscada de la válvula a la turbina. Fueron 3 los conceptos iniciales los cuales mantenían características similares como son la conexión y el prensaestopas, sin embargo la transmisión de movimiento se propuso en diferentes maneras dependiendo del actuador eléctrico utilizado. El primero (Figura 2a) utilizaría un solenoide proporcional, mientras que el segundo (Figura 2b) y el tercero (Figura 2c) utilizarían un servomotor



(a) (b) (c)

Figura 2. (a) Concepto 1. (b) Concepto 2. (c) Concepto 3.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Se decidió utilizar la idea de mantener el eje de motor y el vástago concéntricos mediante un cople que tendría una de sus conexiones totalmente fija y la otra permitiría el movimiento axial por medio de una rosca que alojaría al vástago que le obliga a realizar un movimiento axial el cual cambia de dirección de acuerdo al sentido de giro del motor, como se observa la figura 2c.

Este diseño pareciera cumplir con los requerimientos necesarios para funcionar correctamente y fue elegido como base para trabajar modificaciones sobre él, la primera fue sustituir la cuerda del cople que proporcionaría el movimiento axial por un alojamiento con una geometría que aseguraría el giro del vástago la cuerda que obligaría el movimiento axial fue desplazada hacia otro elemento para no empalmar funciones.

Otra modificación significativa fue la adición de un resorte para evitar movimientos bruscos del vástago al empezar la operación y en los cambios de dirección, esto a manera de un pequeño sistema anti-backlash.

Para facilitar el maquinado y comprometer un ensamble sencillo se fueron realizando más modificaciones: el resorte se situó entre la tuerca del prensaestopas y el elemento roscado, el prensaestopas a su vez se invirtió y además se optó por un O-ring más robusto que pueda absorber más extrusión para poder evitar una empaquetadura de teflón, se colocó una contratuerca de ajuste para evitar que la vibración de la turbina sabotee el sello del prensaestopas, además para mantener constante la presión del resorte se colocaron unos pernos que mantendrían fijo el conjunto de piezas, obteniendo como resultado el concepto de la figura (3a).

Para finalizar el diseño se resolvió el soporte del motor, este se aterrizó al prensaestopas y se sujetó con tornillos, la sujeción del servomotor al soporte dependía particularmente del modelo de este, por lo que se ideo una unión a manera de brida que permitiera al diseño ser flexible en caso de reemplazarlo por otro modelo y el motor fue alojado dentro de una carcasa y así concebimos el concepto final (3b).

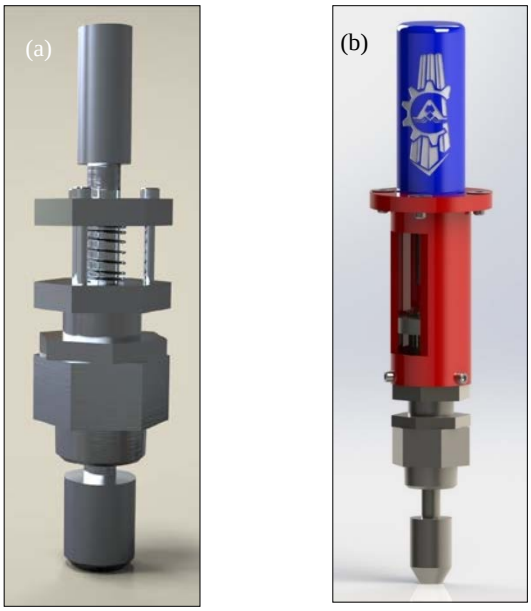


Figura 3. (a) Propuesta preliminar (b) Concepto final

2.2. Diseño de detalle

En esta fase del diseño se analizan los elementos integrados en el dispositivo, por lo que se muestra la función de cada uno de estos y se puntualiza la interacción entre ellos, pensando en cómo

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

se fabricarían y se instalarían en el dispositivo, posteriormente se argumenta sobre la elección de los materiales para las piezas.

Obturador (Figura4a): Su función es permitir o bloquear el paso del vapor hacia las toberas de inyección de la turbina por medio de un cono que tiene en uno de sus extremos. Su geometría es similar que en la válvula original para que pudiese coincidir con el asiento que tiene la turbina.

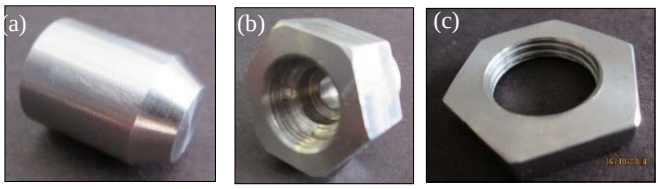


Figura 4. (a)Obturador, (b) Bushing, (c) Tuerca de ajuste.

Bushing (Figura4b): es el elemento que realiza en nexo entre la turbina y la válvula cuenta con una rosca cónica macho para realizar esta conexión haciendo un sello hermético metal-metal, en su otro extremo tiene una rosca hembra con la que recibe al prensaestopas y al fondo de esta se encuentra la cavidad donde se alojan el O-ring y la junta de teflón.

O-ring: es el elemento que realiza el sello del vástago, el material (compuesto con base de Etileno-propileno) y el diámetro de la sección se selecciona por medio del diámetro del vástago en el catálogo oficial de Parker y depende de las condiciones de operación.

Junta: se utiliza como un respaldo que previene el daño por extrusión del O-ring para alargar su vida útil, se monta en forma conjunta con este. Fue maquinado en PTFE ya que es un material plástico termoestable que no presenta descomposición alguna a 260°C y es un buen aislante térmico y es resistente a agentes químicos.

Tuerca de ajuste (Figura4c): se trata de una delgada tuerca hexagonal que tiene como función mantener fijo el ajuste del prensaestopas mediante la presión que ejerce al apretarse a manera de contratuerca para evitar el sabotaje por vibración.

Pernos: Son tres elementos que sirven como guía y límite para la tuerca redonda, se sujetan al prensaestopas. Tienen en el cuerpo maquinados planos que facilitan su ensamble con llave española de 1/8”, el cambio de diámetro que se realiza en la cabeza del perno brinda el límite sobre el cual la tuerca redonda se apoya al recibir la presión del resorte.

Los pernos también evitan que la tuerca redonda gire junto con el vástago para lograr el movimiento axial de este.

Resorte: Su función es ejercer presión entre el prensaestopas y la tuerca redonda para que una vez instalada la válvula pueda mantenerse siempre en contacto ambas partes de la Rosca ACME que tienen el vástago y la tuerca, para disminuir el backlash y los errores de ajuste en el maquinado.

Tuerca Redonda (fig5a): Tiene la función de cambiar el movimiento giratorio del vástago en un desplazamiento axial que te permite la apertura y cierre de la válvula, este tipo de rosca es ideal para la transmisión de movimiento y generalmente se utilizan en aplicaciones donde se necesita aplicar fuerza.

Vástago (Figura5c): Su función es transmitir el movimiento giratorio del vástago a la tuerca roscada para realizar el movimiento axial.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

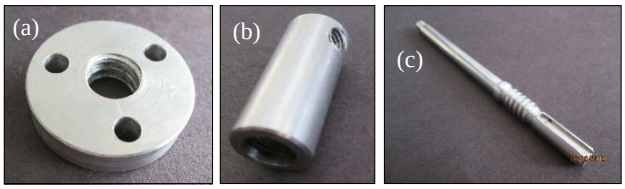


Figura 5. (a) Tuerca redonda. (b) Cople. (c) Vástago.

Cople (Figura 2.5b): Es un elemento cilíndrico que recibe en uno de sus extremos el eje del motor que es sujetado por medio de un opresor evitando que el eje del motor gire dentro del cople, logrando que este gire junto con él. En su otro extremo cuenta con un orificio a manera de carrera donde se desplaza el vástago.

Soporte: Este componente se construye de dos piezas, la parte A (Figura 6a) se ensambla al cilindro del prensaestopas, la unión con la parte B (Figura 6b) se realiza a manera de brida por medio de 4 barrenos. El conjunto brinda un soporte fijo al motor además de albergar el mecanismo de la válvula.

Motor: Se trata de un motor de corriente directa de escobillas, puede ser operado en un rango de 3 a 9 V aunque se recomienda el uso a 6 V, requiere de un flujo de corriente de 450mA en libre giro y hasta 6A con rotor bloqueado cuenta con un encoder de efecto hall de disco magnético con dos canales que entregan 48 conteos por revolución, su función es activar el mecanismo por medio del giro de su eje y posicionar la válvula adecuadamente.

Carcasa: Se trata de un cilindro hueco que tiene como principal función proteger el encoder de los golpes y del vapor que pueda tener contacto con este para mantener su buen funcionamiento.

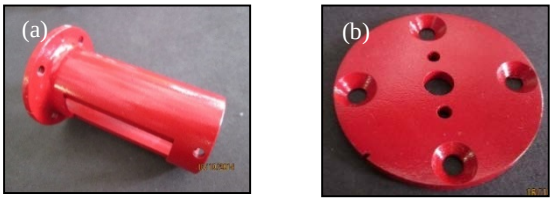


Figura 6. (a) Soporte A. (b) Soporte B.

2.3. Fabricación

En mayor parte el dispositivo cuenta con piezas de acero inoxidable, utilizamos la aleación 316 la cual cuenta con un 2-3% de molibdeno que aumenta su resistencia a la corrosión y suele denominarse “acero a prueba de ácidos o acero grado alimenticio” esta cualidad es de singular importancia, ya que parte del dispositivo está en contacto directo con el vapor de agua suavizada y otros contaminantes en el entorno, otra ventaja del uso de este material en el dispositivo es su baja conductividad térmica en comparación con otros materiales como acero al carbón.

Las piezas que requerían ser maquinadas en este material en particular son el obturador, el bushing y el vástago, las cuales están en contacto directo y cíclico con el fluido de trabajo, sin en cambio otras piezas también fueron elaboradas en este material para evitar bloqueos del mecanismo por causa de expansión térmica. Se recomienda el uso de filos agudos con geometría positiva, lubricación persistente y mantener la profundidad del corte constante ya que se genera mucho calor durante el maquinado.

Se utilizó acero al carbón 1018 para manufacturar el soporte del motor, debido a que esta pieza no logró ser concebida con el material residual de las anteriores por sus dimensiones y geometría, pero

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

al ser un elemento cuya única función critica era la de sostener el motor y fijarlo al dispositivo se optó por este material cuyo costo es bajo, su disponibilidad es muy alta dado a su gran popularidad en el mercado, su facilidad para ser maquinado además de una soldabilidad excelente por cualquier método.

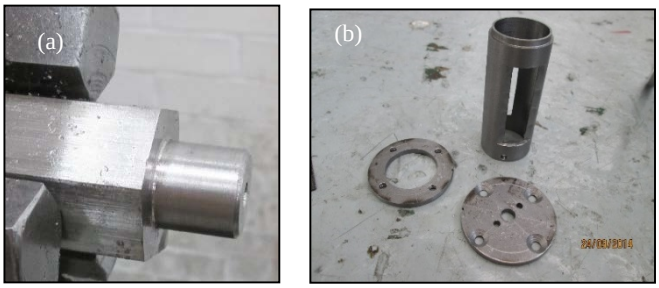


Figura 7. (a) Pieza acero inox. 316. (b) Piezas Acero 1018.

3. Pruebas de funcionamiento

Una vez terminado el ensamble de la válvula se realizaron distintas pruebas de funcionamiento al dispositivo para comprobar la correcta interacción entre los elementos, la activación del motor se realizó por medio del módulo de control diseñado para este dispositivo [4].

3.1. Pruebas en laboratorio

En primera instancia se realizaron dos pruebas de laboratorio sobre una mesa de pruebas manufacturada para ensamblar la válvula y poder contemplar los recorridos del obturador, el primer experimento comprobó que el mecanismo no sufriera bloqueos o atascos y observar el movimiento del obturador, además se verifico que el motor desarrollara el torque necesario para activar el mecanismo.

Durante la segunda prueba se sometió la válvula a un periodo de operación de dos mil ciclos de trabajo continuo para constatar el rendimiento del dispositivo en uso constante. Los experimentos anteriores se repitieron en varias ocasiones para asegurar el correcto funcionamiento de la válvula antes de ser ensamblada en la turbina. Una vez que las pruebas de laboratorio fueron convincentes al mostrar un movimiento controlado del obturador y soportar ciclos de trabajo continuos, se realizaron los ensayos en la turbina.

3.2. Pruebas en sitio

La primer prueba fue realizada para verificar las características dimensionales de la válvula como fue el comprobar que la rosca cónica que une la válvula con la turbina coincidiera en ambos elementos y se comprobó que el diseño del dispositivo no interrumpiera con la operación de la turbina de manera negativa debido a no tener obstáculos para el ensamble del dispositivo en cualquiera de las válvulas manuales.

Durante el progreso de las pruebas fueron necesarias ciertas correcciones al dispositivo, como lo fueron el ajuste de las dimensiones del obturador y del vástago.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Figura 8. Pruebas en laboratorio.

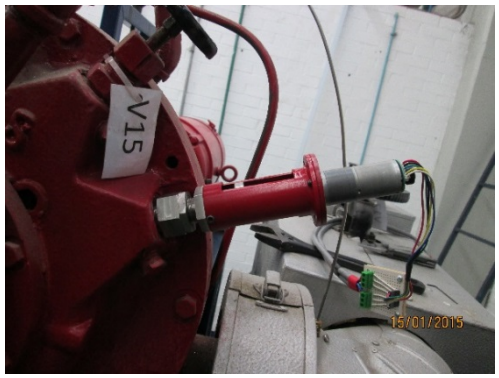


Figura 9: Pruebas en laboratorio

Una vez corregido los detalles se realizaron dos pruebas más en donde pudieron observarse resultados positivos; Al pasar el vapor hacia la tobera con una presión de 7 bar no hubo fugas de vapor, es decir que el sello es hermético y el cual provee el O-ring entre el vástago y el bushing, además del sello metal-metal que se da entre la turbina y el bushing, funcionan perfectamente. Se logró regular el flujo de vapor, pudiéndose elevar la velocidad de la turbina arriba de 4000RPM sin carga y disminuirla hasta las 850RPM comprobando que la servoválvula es funcional.

La operación de la válvula duro aproximadamente una hora y media, con lo que se constató que la temperatura a la que se eleva no causa bloqueos en el mecanismo ni afecta la operación del servomotor o del encoder de este, ya que dicha temperatura es menor en el cuerpo de la servoválvula que en la turbina.

4. Conclusión

La servoválvula diseñada representa una propuesta viable para el control del flujo de vapor que entra a los alabes de la turbina por medio de un circuito de control con un microcontrolador PIC acoplado a la interfaz previamente diseñada de la turbina, aunque si se desea realizar el control automático total de la turbina es necesario implementar a la interfaz de control electroválvulas de dos y tres vías que ofrezcan la desviación y bloqueo del vapor en momentos oportunos para una operación fluida. La producción de este dispositivo tuvo un costo de $2,200.00 MXN, costo que únicamente cubre los gastos de la fabricación de la carcasa, costo del servomotor, O-ring, resorte y del material (teflón, acero inoxidable 316, acero 1018).

Los costos de manufactura fueron nulos ya que cada una de las piezas del mecanismo fueron maquinadas en los laboratorios de manufactura L-1 de la FES Aragón demostrando el alcance que se tiene en estos, con excepción de la carcasa del motor, aunque una cotización de las piezas en un taller mecánico nos arrojó un costo de fabricación de $12,000 MXN. Por lo que la suma de estas dos cantidades puede traducirse como el precio real de la servoválvula en $14,200 MXN (sin considerar costos de diseño) el cual es un monto mucho menor en comparación con dispositivos existentes en el mercado cuyo precio es a partir de los $50,000 MXN sin tomar en cuenta los acondicionamientos necesarios para la instalación mecánica y compatibilidad con la interfaz de control.

Cabe señalar que el mecanismo pudiese ser optimizado en gran parte con técnicas de manufactura sofisticadas como son máquinas herramientas de control numérico, metalurgia de polvos, fundición por inyección, entre otras, las cuales presentan costos más elevados.

Agradecimientos

Agradecemos a la UNAM porque este proyecto es un ‘Trabajo realizado con el apoyo del Programa UNAM-DGAPA-PAPIME’.

Un agradecimiento especial a todos los alumnos y profesores, que preocupados por mejorar la enseñanza de la carrera de Ingeniería Mecánica en la FES Aragón, han participado con gran entusiasmo en este proyecto.

Referencias

[1] Velazquez Garibay R.A. (2015). Diseño de una Servoválvula para turbina COPPUS. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de estudios Superiores Aragón.
[2] http://www.aragon.unam.mx/unam/index.html.
[3] Nicolás García S. A (2013). Sistema de supervisión y Adquisición de datos para un ciclo Rankine. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Aragón.
[4]Millán, Cesar. (2015). Diseño del módulo de control de una Servoválvula. (Tesis de licenciatura inédita) Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de ingeniería).

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

2. Diseño e implementación de un Sistema de Control basado en Visión para manipular un Robot de 2 g.d.l.

Trejo Rugerio Uriel, Méndez Zapata Elías, Hernández Zempoaltecatl Rodrigo, Cano Corona Ariana

elias.mendez@uptlax.edu.mx

Universidad Politécnica de Tlaxcala, Programa Educativo de Ingeniería Mecatrónica, Av. Universidad Politécnica No.1 Tepeyanco, Tlaxcala, México C.P. 90180

Resumen

Este trabajo presenta los resultados obtenidos del proyecto, dónde inicialmente se planteó el diseño del brazo robot en un software de diseño con la finalidad de tener una idea concisa del mecanismo a construir y por ende a controlar, para posteriormente llevar a cabo su implementación en algún ambiente de riesgo para el ser humano. Se presentan las pruebas con visión artificial sobre la plataforma de LabVIEW, basándose primeramente en la adquisición y procesamiento de video. Con la finalidad de poder obtener el centroide de figuras circulares, así como la discriminación de colores basándonos en el sistema RGB, con esto nos referimos a trabajar con colores primarios, teniendo como consecuencia que se puede ya trabajar con cualquier color dado de alta en la gama que ofrece este sistema.

El video adquirido y procesado servirá para tomar decisiones que van a controlar al Robot, esto se logra utilizando los módulos de NIVision. Una vez realizado el procesamiento y obteniendo las condiciones necesarias para que el sistema trabaje debemos transferir esta información al robot, para lo cual utilizamos con interfaz de comunicación la plataforma de Arduino, de esta manera logramos la vinculación entre Visión, Software y Robot.

Palabras clave: Vision, Robot, Control, Labview

1. Introducción

La idea de desarrollar el proyecto nace de la necesidad que existe en nuestro país debido a la falta de desarrollo de tecnología nacional en el área de Robótica, específicamente en Brazos Robots Manipuladores. Este proyecto está dirigido a disminuir situaciones de riesgo en los procesos que presenten peligro para el ser humano, tales como manejo de sustancias peligrosas (ácidos o radiación), altos voltajes e incluso condiciones que representan un peligro latente como en la fundición de metales. De esta manera se pretende demostrar primeramente que se puede controlar y programar un brazo robot de una manera diferente en lugar de llevarlo punto a punto. Por otra parte la factibilidad que tiene el quitar mano de obra de los procesos riesgosos puede disminuir en un alto índice accidentes que puede sufrir el ser humano principalmente, cuidando potencialmente su integridad.

La realización del proyecto ha sido directamente en las instalaciones de los Laboratorio de Robótica e Instrumentación Virtual que pertenecen al Programa Educativo de Mecatrónica dentro de la Universidad Politécnica de Tlaxcala. Inicialmente se realizaron pruebas de adquisición de imágenes por

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

medio de una cámara web y LabVIEW basándose en ejemplos del mismo software para que posteriormente se desarrollara una nueva aplicación ya con las condiciones de programación que el proyecto demanda.

2. Descripción del Sistema

El objetivo general del proyecto es poder desarrollar un robot manipulador que tenga 2 grados de libertad el cual sea capaz de realizar funciones especiales que permitan adaptarse a las necesidades de riesgo previstas y no previstas que pueden presentar riesgo para el ser humano dentro de algún proceso, como por ejemplo:

- Diseño, análisis de esfuerzos y construcción de un brazo mecánico de 2 grados de libertad.
- Utilizar como interfaz de comunicación Arduino en conjunto con LabVIEW para el control y programación del Brazo Robot.
- Implementación de Visión Artificial para que sea una alternativa innovadora de programación en robots manipuladores.

2.1 Cinemática y Dinámica del Robot

Primeramente se analizó la cinemática y dinámica del robot de 2 g.d.l. que se diseñó en SolidWorks, mismo que sería dotado de 2 servomotores y estructura de aluminio. El estudio cinemático y dinámico del robot consiste en aplicar el método geométrico para el cálculo de la cinemática para finalmente con la formulación de Euler Lagrange se obtenga el modelo dinámico del robot.

Primero las coordenadas del centro de masa del primer eslabón:

$$x_1 = l_1 sen(q_1) \quad (1)$$
$$y_1 = l_1 cos(q_1) \quad (2)$$

Y la velocidad es:

$$v_1 = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{c1}\cos(q_1)\dot{q} \\ -l_{c1}\mathrm{sen}(q_1)\dot{q} \end{bmatrix} \quad (3)$$

y la velocidad al cuadrado del centro de masa es:

$$v_1^2 = v_1^T v_1 = l_{c1}^2 \dot{q}_1^2 \quad (4)$$

y por último la energía cinética correspondiente al primer eslabón.

$$K_1(q,\dot{q}) = \frac{1}{2} m_1 v_1^T v_1 + \frac{1}{2} I_1 \dot{q}_1^2 \quad (5)$$
$$K_1(q,\dot{q}) = \frac{1}{2} m_1 l_{c1}^2 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{q}_1^2 \quad (6)$$

Ahora las coordenadas del centro de masa del segundo eslabón.

$$x_2 = l_1 sen(q_1) + l_{c2} sen(q_1 + q_2) \quad (7)$$
$$y_2 = -l_1 sen(q_1) - l_{c2} cos(q_1 + q_2) \quad (8)$$

La velocidad del centro de masa del segundo eslabón es.

$$v = \begin{bmatrix} \dot{x}_2 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos(q_1)\,\dot{q}_1 + l_{c2}\cos(q_1 + q_2)(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ l_1\,\mathrm{sen}(q_1)\,\dot{q}_1 + l_{c2}\mathrm{sen}(q_1 + q_2)(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \end{bmatrix} \quad (9)$$

y por último la energía cinética correspondiente al segundo eslabón.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

$$K_2(q,\dot{q}) = \frac{1}{2}m_2 v_2^T v_2 + \frac{1}{2}I_2[\dot{q}_1 + \dot{q}_2]^2 \quad (10)$$

Ahora que ya tenemos la energía cinética de los dos eslabones, lo siguiente es encontrar las energías potenciales.

$$U_1(q) = -m_1 l_{c1} g\cos(q_1) \quad (11)$$
$$U_2(q) = -m_2 l_{c1} g\cos(q_1) - m_2 l_{c1} g\cos(q_1 + q_2) \quad (12)$$

Con las ecuaciones obtenidas se obtiene la ecuación llamada el Lagrangiano de la siguiente manera.

$$L(q,\dot{q}) = K_1(q,\dot{q}) + K_2(q,\dot{q}) - U_1(q) - U_2(q) \quad (13)$$

Las 2 ecuaciones dinámicas el robot se obtiene aplicando las ecuaciones de Lagrange:

$$\tau_1 = [m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + m_2 l_{c2}^2 + 2m_2 l_1 l_{c2}\cos(q_2) + I_1 + I_2]\ddot{q}_1 + [m_2 l_{c2}^2 + m_2 l_1 l_{c2}\cos(q_2) + I_2]\ddot{q}_2 - 2m_2 l_1 l_{c2}\,\mathrm{sen}(q_2)\dot{q}_1 q_2 - m_2 l_1 l_{c2}\,\mathrm{sen}(q_2)\,\dot{q}_2^2 + [m_1 l_{c1} + m_2 l_1]g sen(q_1) + m_2 g l_{c2} sen(q_1 + q_2),$$

$$\tau_2 = [m_2 l_{c2}^2 + m_2 l_1 l_{c2}\cos(q_2) + I_2]\ddot{q}_1 + [m_2 l_{c2}^2 + I_2]\ddot{q}_2 + m_2 l_1 l_{c2}\,\mathrm{sen}(q_2)\dot{q}_1^2 + m_2 g l_{c2} sen(q_1 + q_2) \quad (14)$$

Con este análisis se tiene el sustento matemático del robot de dos grados de libertad que se construirá debido a la aplicación que este tendrá será necesario conocer su cinemática para determinar el tipo de control que este llevara, ya sea de posición o movimiento; y su dinámica tendrá que emplearse para poder determinar la estabilidad del controlador que se va a emplear bajo el criterio de estabilidad de Lyapunov.

2.2 Desarrollo

El funcionamiento general del sistema se describe en la figura 1, en donde se puede observar la manera en que cada bloque desarrollado entra en funcionamiento como parte integral del prototipo lo que permite que el propósito del proyecto se cumpla en su totalidad.

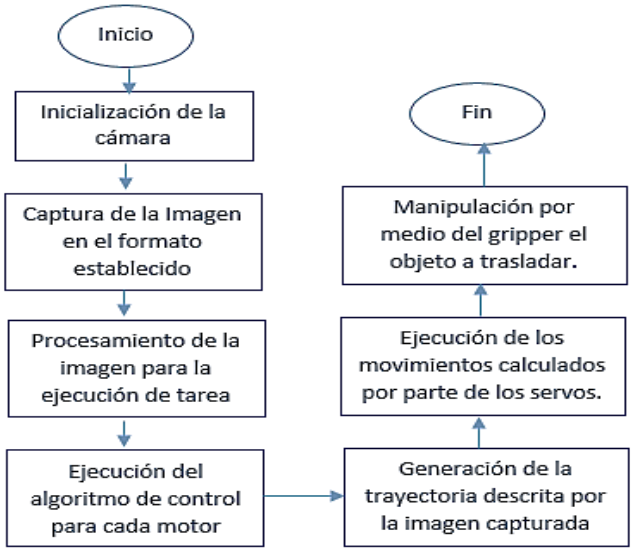


Figura 1. Diagrama general de funcionamiento.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Posteriormente se llevó acabo su construcción para el periodo de pruebas. Cabe mencionar que el brazo robot es únicamente un prototipo que será utilizado en pruebas ya integrado con LabVIEW y Arduino.

En la figura 2 se puede observar la construcción del robot de prueba mismo que cuenta con 2 grados de libertad, 2 servomotores y una estructura de aluminio en la base y también en las extensiones de los ejes. En la parte posterior del robot se encuentra la interfaz de comunicación entre software y hardware, está basada en la plataforma de Arduino. De la cual se utilizan las entradas y salidas digitales mismas que serán controladas desde LabVIEW ya que nos ofrece la flexibilidad de contar con los toolkit para programar en diagrama a bloques del software. La conexión se trabaja por medio de USB debido a que tenemos un retardo mínimo de comunicación, hablando de milisegundos.

Una vez construido el robot, se comenzó con la programación en LabVIEW y sus módulos de Vision Assistant para la adquisición de video por medio de una Cámara HD Microsoft.

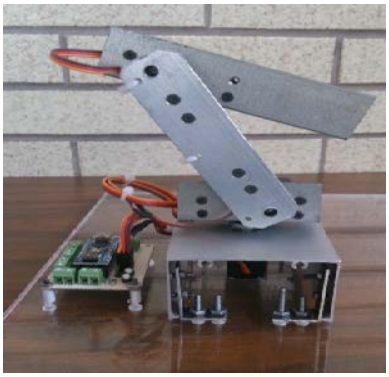


Figura 2. Brazo Robot de 2 g.d.l.

Esto se hace configurando una serie de parámetros dentro del asistente de visión, los cuales se mencionan a continuación:

- Seleccionar la cámara que será utilizada para la adquisición.
- Calidad de la imagen en 1280 x 720 a 10 fps.
- El formato de la imagen es BMP.
- Adquirir imágenes de manera continua se asemeja a captura de video.
- La imagen adquirida se guarda y es sustituida en el siguiente ciclo.

Adquirida la imagen procedemos a manipular características esenciales para el programa, tales como:

Original Image (Imagen Original).- Este bloque nos indica la adquisición de la imagen por medio de la cámara seleccionada, aquí todavía no se aplica procesamiento.

Color Threshold (Umbral de color).- Se aplica un umbral para los tres planos de una imagen en color y coloca el resultado en una imagen de 8 bits.

Fill Holes (Llenar los agujeros) / Adv. Morphology, Remove Small Objects (Eliminar objetos pequeños) / Adv. Morphology

Realiza operaciones de alto nivel sobre manchas en imágenes binarias.

Get Center of Mass (Conseguir centro de masa) / Particle analysis.- Muestra los resultados de medición para mediciones de partículas seleccionados realizaron en la imagen.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Set Coordinate System (Fijar sistema de coordenadas).- Construye un sistema de coordenadas basado en la ubicación y la orientación de una característica de referencia.

Fit Circle (Ajuste de círculo) / Find Circular.- Localiza un borde circular en una región de interés.

Con las herramientas de Vision Assistant antes mencionadas realizamos el procesamiento y al mismo tiempo confirmamos si se cumplen las siguientes condiciones:

- Si es color y forma ---------- (True)
- Si es color pero no forma ---------- (Falso)
- Si no es color pero si es forma ------- (False)

El uso de funciones para imágenes, nos permite analizar el contenido de una imagen para obtener información específica. También se pueden utilizar para modificar la geometría de la imagen, calibrar la imagen para que pueda tomar medidas en unidades del mundo real, y corregir la imagen.

Utilizamos un Histograma para contar el número total de píxeles en cada valor de escala de grises y graficar los resultados. Se Puede utilizar el histograma para determinar si la intensidad global de la imagen es adecuada para la tarea de inspección o si la imagen contiene distintas regiones de ciertos valores en escala de grises.

La función Geometría nos ayuda a modificar la representación geométrica de una imagen mediante la transformación, rotación, o remuestreo los datos de imagen. Por otra parte LabVIEW nos permite abrir una nueva imagen desde un archivo. Incluso la podemos calibrar para hacer mediciones en unidades del mundo real.

Al momento de adquirir la imagen se procedió a manipularla para poder realizar la diferencia entre colores, trabajando con el sistema RGB (Red, Green y Blue por sus siglas en inglés), de esta manera se pudo lograr que el software se enfocara únicamente en detectar el color que nosotros seleccionamos. Al mismo tiempo se definió con que formas se trabajaría, para cumplir la condición que va a controlar al brazo robot. Para ello se decidió trabajar con círculos, de esta manera se podía definir la única condición que el sistema tomaría en cuenta para funcionar.

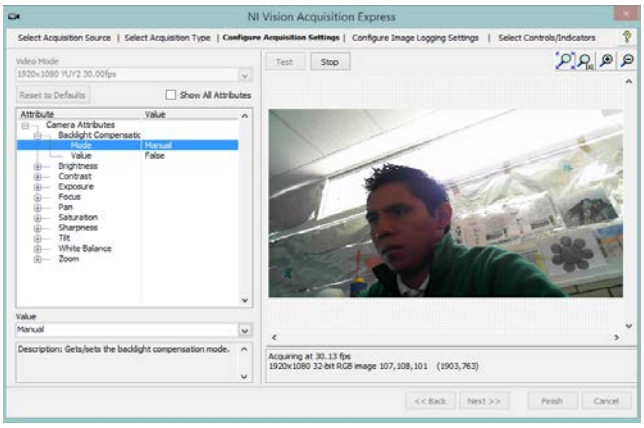


Figura 3. Configuración de la cámara para la adquisición en Vision Assistant.

En la figura 4 se muestran lo que es una parte del diagrama a bloques de la programación y también lo que es la parte del Panel de Control que es la interfaz gráfica con el usuario. En lo que tenemos como diagrama de bloques se desarrollaron Sub-VI que son considerados como subprogramas dentro de un programa principal, esto con la finalidad de hacer más compacta la distribución del

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

programa. Pero también para tener un control o restricción a la información del mismo. En estos Sub-VI encontramos programas que controlan al brazo robot y la parte de visión, así como las condiciones de funcionamiento de todo el programa en conjunto. Con esto se pretende que cuando se hagan las actualizaciones del programa y del sistema desarrollado solo se maneje esta primera versión como un Sub-VI para hacer más modular su programación y su incorporación con mas opciones.

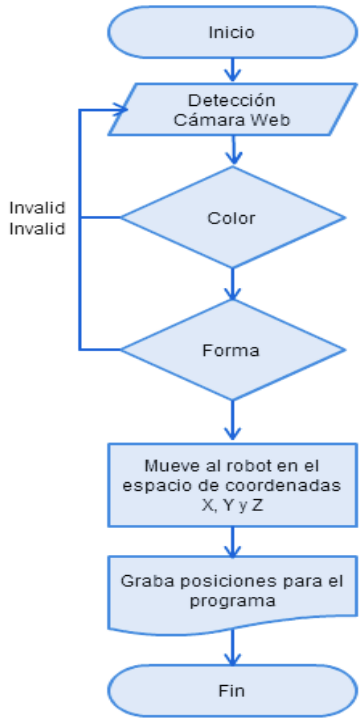


Figura 4. Diagrama de flujo.

3. Análisis de resultados

Los resultados obtenidos fueron bastante favorables ya que la construcción del robot resulta apta para trabajar en conjunto con Arduino y LabVIEW. Por la parte de adquisición de video no tuvimos inconveniente. Lo complicado fue realizar la diferenciación de otros colores ya que se trabaja con gamas diversas y se identificó que cualquier factor externo (principalmente iluminación) modifica las condiciones de trabajo, sin embargo se logró erradicar los problemas que presentaban dichos factores.

Al integrar el brazo robot, LabVIEW y Arduino (como interfaz de comunicación entre robot y software) se pudieron realizar pruebas específicas para poder mover el brazo robot en base a la forma que detecta la cámara. Esto puede ser posible si se plantea una relación entre el plano X, Y, y el ángulo al cual deben de moverse los servomotores en cada grado de libertad.

En la figura 5 y la figura 6 se observan otras imágenes que son de relevancia en el proyecto. Por una parte tenemos una cámara HD desarrollada por Microsoft (webcam) la cual nos permite, debido a sus características, configurar diferentes resoluciones en la adquisición que son factor en el procesamiento si no se cuenta con una computadora de propiedades altas, también nos proporciona una buena calidad en la imagen sin problema alguno. De igual manera tenemos la pequeña tarjeta que se diseñó para lo que serán las Entradas y Salidas mismas que serán controladas por medio del software LabVIEW, con esto logramos conexiones directas y firmes evitando cruce de cables que pueden obstaculizar las trayectorias del robot, incluso que podrían dañar su estructura

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

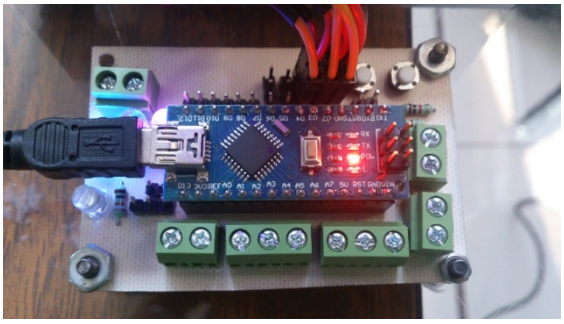


Figura 5. Tarjeta desarrollada para Arduino NANO, es la interfaz de comunicación entre robot y software.

Figura 6. Cámara HD para la adquisición de video.

En la figura 8 se muestran lo que es una parte del diagrama a bloques de la programación y también lo que es la parte del Panel de Control que es la interfaz gráfica con el usuario. En lo que tenemos como diagrama de bloques se desarrollaron Sub-VI que son considerados como subprogramas dentro de un programa principal, esto con la finalidad de hacer más compacta la distribución del programa. Pero también para tener un control o restricción a la información del mismo. En estos Sub-VI encontramos programas que controlan al brazo robot y la parte de visión, así como las condiciones de funcionamiento de todo el programa en conjunto.

Dentro de la programación en el diagrama a bloques tenemos la opción de poder incluir algún programa realizado en el software MATLAB para ejecutar scripts. Para ello necesitamos tener una copia con licencia del software MATLAB versión 6.5 o posterior instalado en el equipo para utilizar nodos de scripts de MATLAB porque los nodos de script invocan el servidor de la escritura de software MATLAB para ejecutar scripts escritos en la sintaxis del lenguaje MATLAB. Debido LabVIEW utiliza la tecnología ActiveX para implementar nodos de scripts de MATLAB, que sólo están disponibles en Windows.

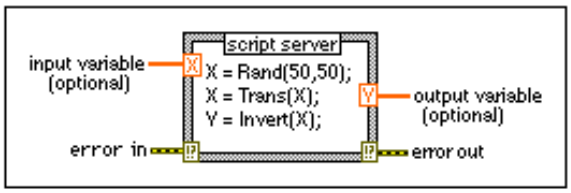


Figura 7. Panel de control donde observamos la discriminación de colores y forma circular del objeto.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

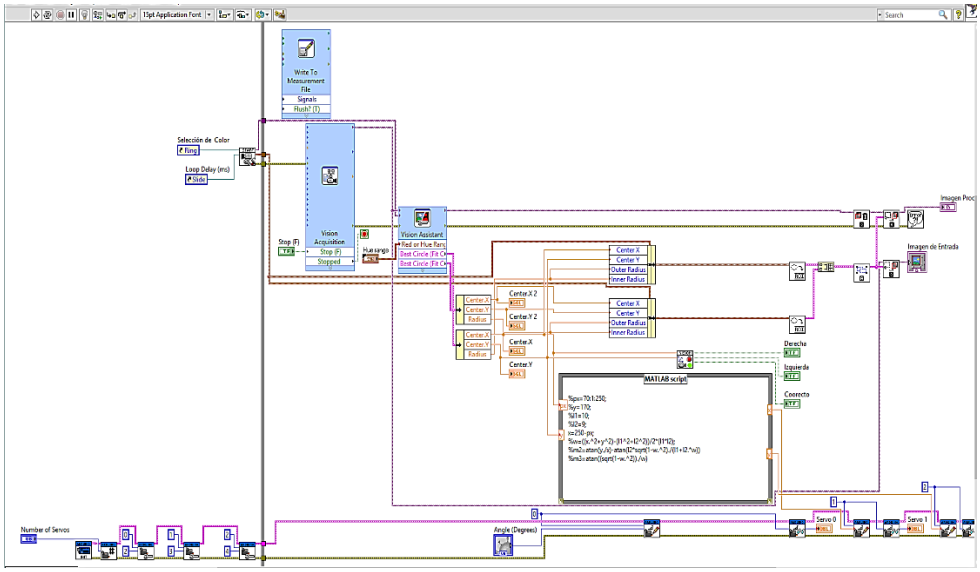


Figura 8. Perspectiva del programa en diagrama de bloques LabVIEW.

4. Conclusiones

El software desarrollado en la plataforma de trabajo de Labview es versátil ya que permite poder configurar varios parámetros del procesamiento de la imagen y no queda restringido a trabajar solo con un periférico, sino que puede migrarse el control a diferentes dispositivos para su aplicación, además de contar con la posibilidad de seguir actualizando el sistema de control, ya que nos permitiría poder implementar rutinas definidas con la ayuda de la cinemática inversa, o bien, el sistema nos permita poder evaluar el desempeño de controladores para el control de posición.

Se ha logrado que el manipulador siga la trayectoria dada por la figura debido a la relación entre el plano X, Y, y el ángulo de los servomotores. Lo cual significa un gran aporte ya que continuamos sobre la línea que marca al proyecto de manipular y programar un brazo robótico en lugares que representan riesgo para el ser humano, como pueden ser:

- Manipulación de ácidos.
- Área de la metalurgia.
- Soldadura.
- Electricidad en alta tensión.
- Exploración.

La siguiente etapa es pasar al espacio x, y, z. La variable “z” será tomada del mismo sistema de visión con una sola cámara. Logrando un sistema compacto e innovador. Este sistema se puede migrar a diferentes aplicaciones para que pueda ser implementado de manera efectiva, ya que al ser un programa en código abierto permite que se le pueda parametrizar en diferentes condiciones de operación.

El sistema es viable desde diversos puntos, pero uno que es conveniente resaltar es el hecho de demostrar el buen desempeño del sistema de control con una cámara convencional, lo que demuestra que no se requiere una cámara de alta resolución para poder tener un control óptimo y estable del sistema, sino es más por el algoritmo de visión desarrollado.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

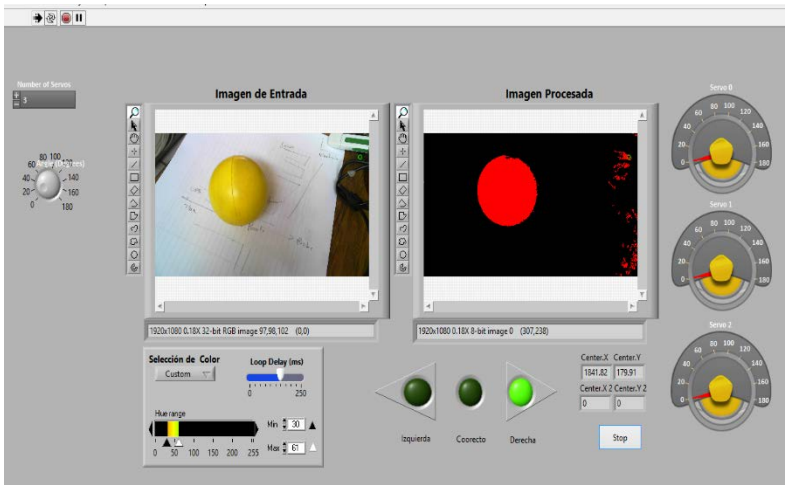


Figura 9. Panel de control donde observamos la discriminación de colores y forma circular del objeto.

Referencias

[1] Lajara J.R., Sistemas Integrados con Arduino, Ed. Alfaomega, México, 1ra. Edición, 2014.
[2] Reyes F., Robótica: Control de Robots Manipuladores, Ed. Alfaomega, México, 1ra. Edición, 2014.
[3] Kelly R., Control de Movimiento de Robots Manipuladores, Ed. Pearson Prentice Hall, 2da. Edición, 2004.
[4] Reyes F., Arduino: Aplicaciones en Robótica, Mecatrónica e Ingenierías, Ed. Alfaomega, México, 1ra. Edición, 2014.
[5] http://www.ni.com/vision/esa/vdm.htm Página Oficial de National Instruments, categoría Vision.
[6] Molina J., Programación Gráfica para Ingenieros, Ed. Alfaomega, México, 1ra. Edición, 2012.
[7] Blum J. Arduino a Fondo, Anaya Multimedia, 2014.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

3. Control de un robot cartesiano por medio de Matlab para su uso como impresora 3D

Jorge Gudiño Lau, Aguilar Castillo Rodolfo Benjamín, Covarrubias Contreras Ángel Alí, Palafox Rico Gerardo Javier, Rodríguez García Oscar Alejandro.

racso_97@hotmail.com

Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Electromecánica
kilómetro 20 carretera Manzanillo-Cihuatlán s/n (Manzanillo), Del Paraíso, Manzanillo, Col.

Resumen

El presente trabajo muestra el diseño mecánico, la construcción e implementación de un control digital a un robot tipo cartesiano cuyo propósito es el de una impresora 3D.

Palabras clave— robot de 3gdl, estructura, impresora 3D, extrusor, filamento.

.

1. Introducción

El proyecto general consiste en el diseño, construcción y control de un brazo robot de tres grados de libertad. El cual debe realizar una aplicación que en este caso consistirá en una impresora 3D. El control del brazo se realizará de forma digital aplicando los conocimientos de las materias de Control digital y robótica, respectivamente. También se implementará una interfaz gráfica que monitoreé todas las variables del proceso en tiempo real, mediante tarjetas de adquisición de datos de cualquier marca.

En el año 1983 Chuck Hull, un inventor destacado en el campo de la óptica iónica, idea el primer método de impresión 3D: la estereolitografía. Posteriormente en el año 1988 la compañía 3D Systems, fundada por Chuck Hull, comercializa las primeras máquinas de impresión estereolitográficas.

De los años 1988- 1990 se desarrollan nuevos métodos de impresión: La impresión por deposición de material fundido (fused deposition modelling o FDM). La impresión por láser (selective laser sintering o SLS).

En el año 1990 Scott Crum, que había concebido el método de impresión FDM, establece la empresa Stratasyspara la comercialización de su invento.

En 1993 Un grupo de estudiantes del MIT concibe la impresión 3D por inyección. Dos años más tarde, en 1995, inician la venta de los primeros equipos basados en esta tecnología a través de la compañía 3D Systems, creada en 1988 por Chuck Hull.

En el 2005 El Dr Bowyer, de la Universidad de Bath, Reino Unido, desarrolla la primera máquina 3D autor replicante: la RepRap, que supone un salto adelante en la normalización y acceso a las impresoras tridimensionales.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

En el 2009 La empresa Organovo ingenia la impresora 3D MMX Bioprinter, la primera capaz de fabricar tejidos orgánicos. Chuck Hull, un inventor destacado en el campo de la óptica iónica, idea el primer método de impresión 3D: la estereolitografía. [1]

Figura 1. Robot cartesiano de 3 grados de libertad

2. Desarrollo

El desarrollo de este proyecto consta de dos partes principales, el sistema mecánico y el sistema de control.

2.1 Sistema Mecánico

Dentro del sistema mecánico, la estructura, se realizó basándonos en sistemas cartesianos previamente construidos [3], usando perfil tipo Bosch, para un diseño limpio y que estuviera nivelado. Como se observa en la figura 2.

Figura 1. Estructura con perfil tipo Bosch.

Como se puede observar en la figura 3, se montaron los ejes con distintos mecanismos de desplazamiento [7], dos ejes se desplazan con tornillos de potencia de 10 hilos por pulgada y el tercer eje se desplaza por medio de un arreglo de engrane y cremallera [8].

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Figura 2. Ejes de transmisión.

Como se puede observar en la figura 4, el eje X se desplaza gracias a un tornillo de potencia de 50 centímetros [9].

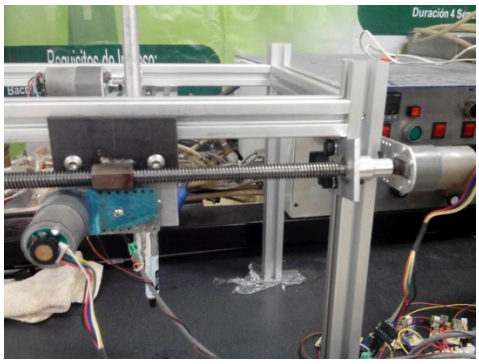


Figura 3. Mecanismo de desplazamiento del eje X.

El desplazamiento en el eje Y igualmente es gracias a un tornillo de potencia de 30 centímetros como se muestra en la figura 5, en este eje se encuentra montado el eje z, donde está la cremallera y el engrane [10]. Para el eje Z, que es donde se encuentra montado el extrusor, que es el que nos permite imprimir gracias al aporte de filamento PLA. Es el que se muestra en la figura 6.

Figura 4. Mecanismo de desplazamiento en el eje Y.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

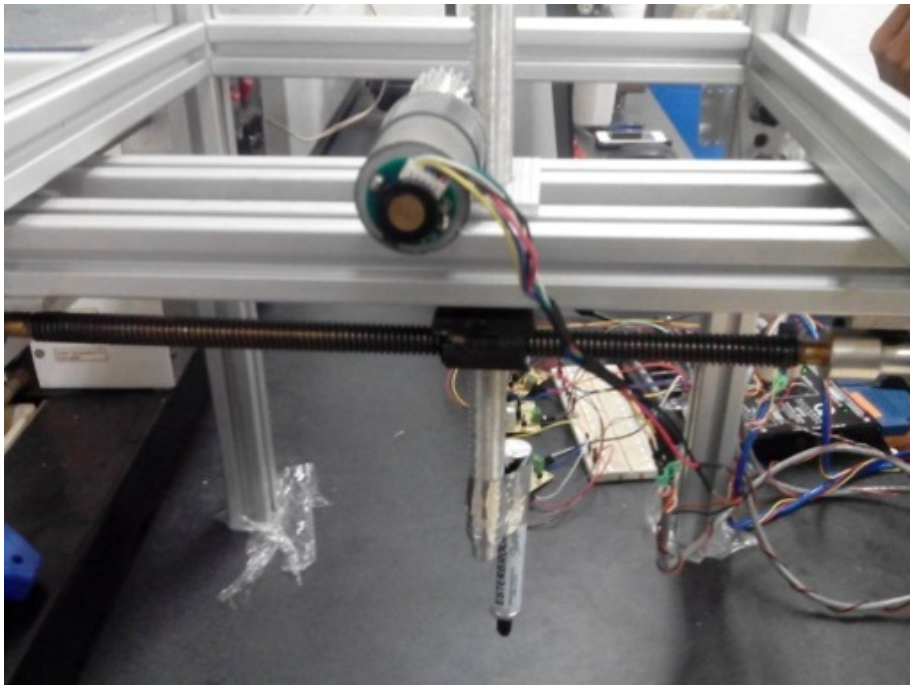


Figura 5. Mecanismo de desplazamiento del eje Z.

2.1 Sistema Electrónico

Para el diseño electrónico se optó por utilizar tarjetas QPID Quanser [2] figura 7 y puentes H con diodos figura 8, ya que no habrá altos picos de corriente y este tipo de puente soporta perfectamente la corriente [4].

La simulación del diagrama electrónico de la figura 9, muestra las conexiones de los motores, hacia los puentes h, que son los que nos permiten hacer un cambio de giro, conectando a los voltajes del motor y los encoders de los motores se conectan a la tarjeta Quanser, para ser manipulada en tiempo real en el software Matlab.

Figura 6. Tarjetas Quanser.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

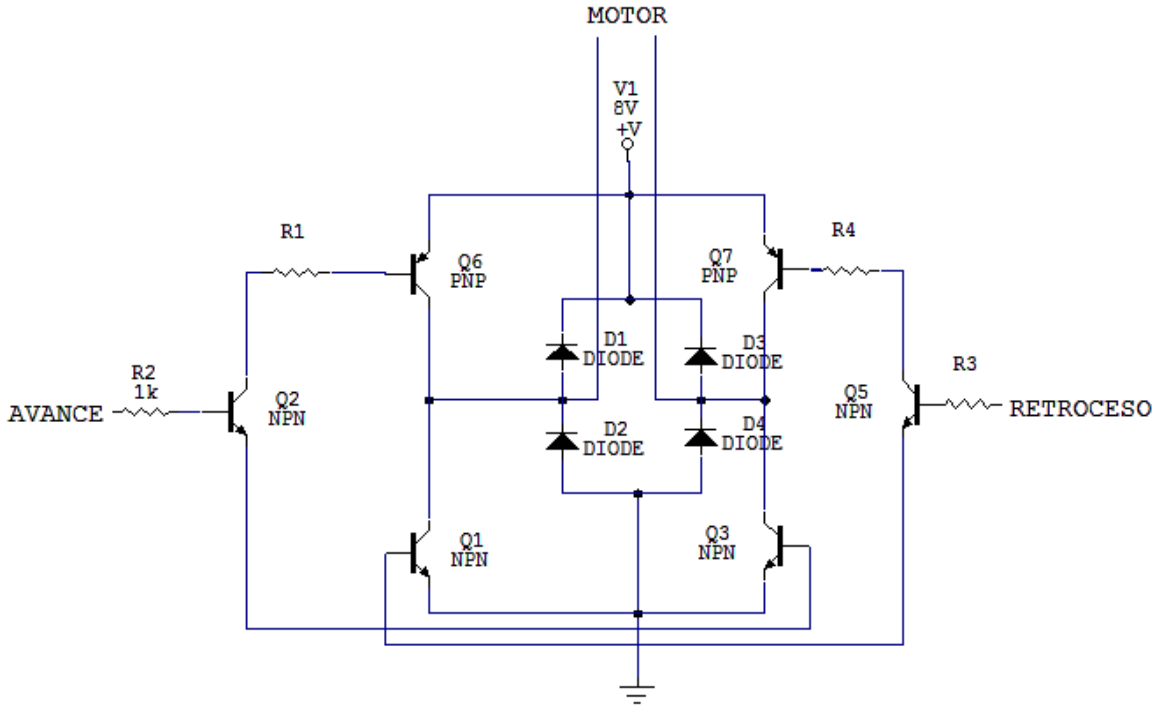


Figura 7. Puente H.

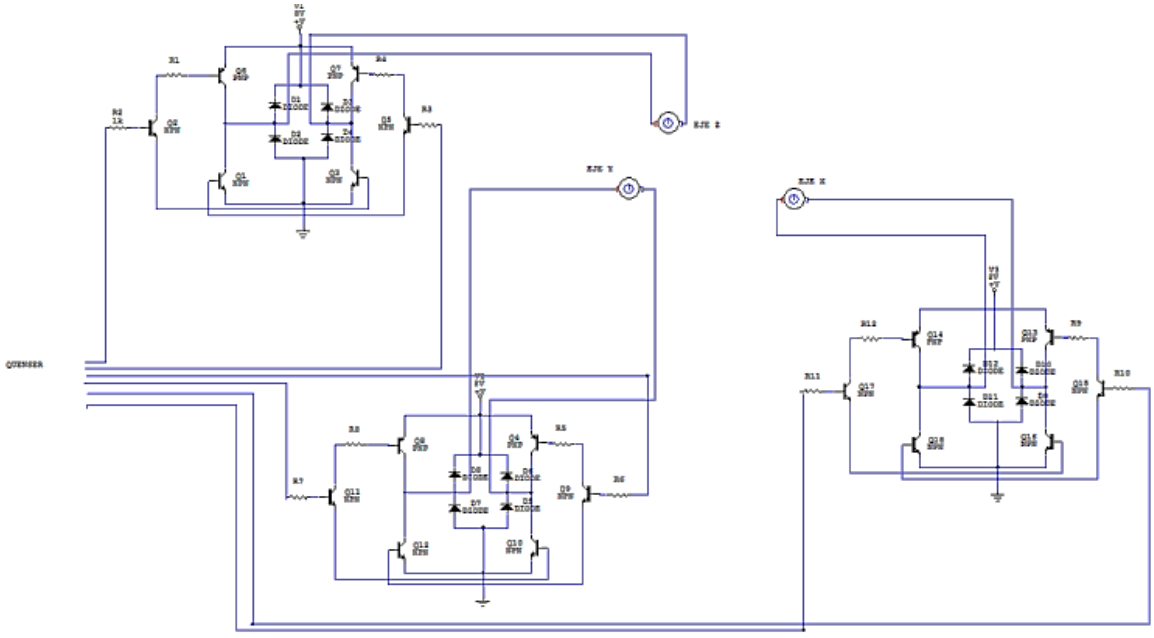


Figura 8. Diagrama electrónico.

2.2 Sistema de control.

El controlador del sistema de presencia remota fue creado en el software Matlab con las tarjetas Quanser para manipular el robot en tiempo real [5].

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

El controlador funciona de la siguiente manera: los motores montados en la estructura donde están los ejes mandan una señal por medio de los encoders hacia el programa Matlab como se muestra en la figura 10, en donde el programa lee los pulsos con cada vuelta del motor, y en el programa se hizo una conversión para el desplazamiento de los ejes, en el caso de los tornillos el desplazamiento es de 10 hilos por pulgada y en el caso del engrane y la cremallera el desplazamiento es de 20 dientes por vuelta.

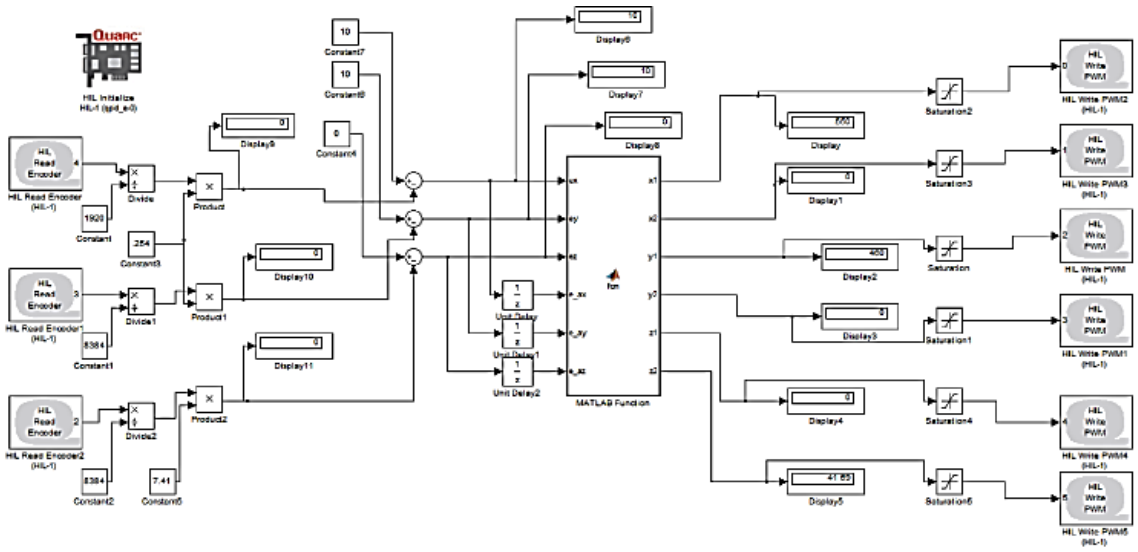


Figura 9. Control en Software Matlab.

En el control se calculó todo lo que conlleva al movimiento del robot, las fuerzas ejercidas en el robot y los cambios que se deben de tener en cuenta para manipularlo correctamente. Respecto a este apartado es mucha información que necesita para especificar los cálculos realizados en el control.

2.3 Generación de trayectoria.

La generación de trayectoria se realizara con un polinomio de quinto orden, que permite tener control tanto de la velocidad como de la aceleración [6].

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5$$
$$t = 0$$
$$q(t_0) = a_0 \qquad (1)$$
$$\dot{q}(t_0) = a_1$$

3. Resultados

Las pruebas en nuestros robot cartesiano, tuvo mucho que ver con el sistema mecánico, ya que el control va muy apegado al resultado del sistema físico, en el software nos podía demostrar el avance, pero en tiempo real podía haber una diferencia de desplazamiento. Como se muestra en la figura 11 se puede observar el mecanismo ya completamente armado.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

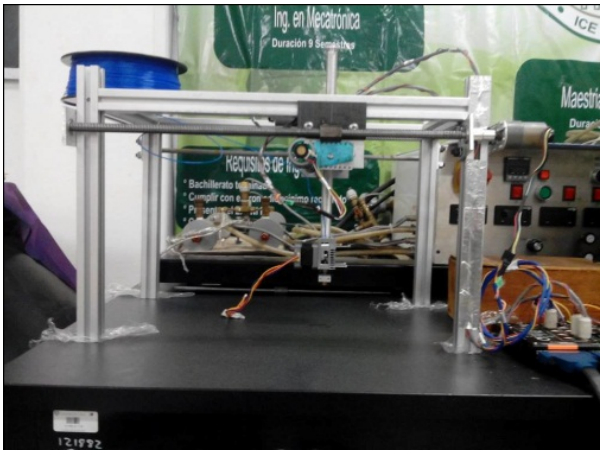


Figura 10. Robot cartesiano con extrusor para impresora.

Se realizaron pruebas con cada eje para ver su porcentaje de error, para que el error se mantuviera en un +- 2%. Como se muestra en la figura 12, la prueba de desplazamiento en el eje X. Así el desplazamiento se corrigió a un 2% de error y con el eje Y y Z, se dispuso a realizar la misma prueba, como se puede observar en la figura 14. Finalmente se realizaron pruebas de figuras haciendo uso de los 3 ejes al mismo tiempo, quedando la figura con un error menor al 2%.

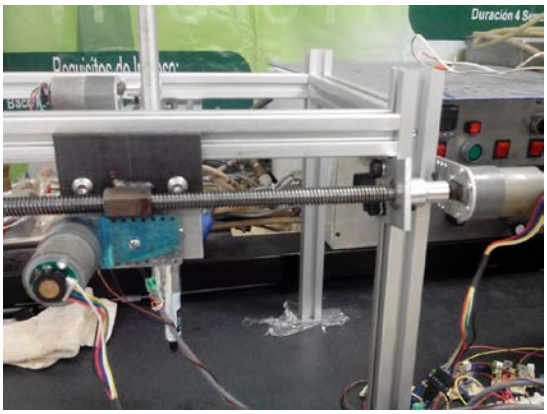


Figura 11. Prueba en eje X.

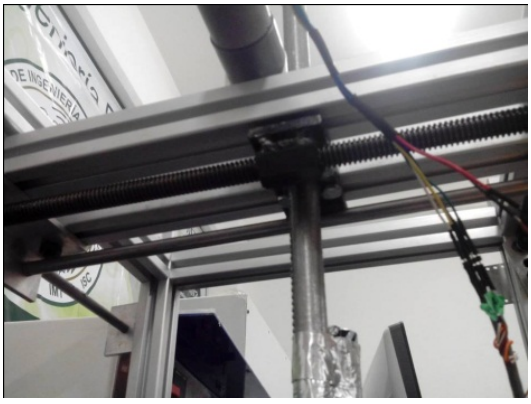


Figura 12. Prueba en el eje Z.

3.1 Tablas

Actividad	Descripción
Planteamiento del problema y definición de objetivos.	Se definen el problema a solucionar y los objetivos a cumplir en función de los lineamientos establecidos previamente por la academia de profesores en el protocolo del PI.
Justificación del proyecto.	En este apartado se presentan las razones por las cuales se realiza el estudio y expresan las motivaciones para desarrollar el proyecto y se responde a la pregunta problema.
Investigación de antecedentes del tema.	Se relacionan los trabajos previos sobre el tema, en determinado período de tiempo.
Elaboración del cronograma de trabajo.	Plan de actividades, que muestra en un orden lógico y secuencial la duración del proceso investigativo, en una forma gráfica (Gráfica de Gantt).
Análisis y diseño de componentes mecánicos.	Realizar el diseño estructural y de transmisión con el fin de tener un buen soporte y movimiento motriz.
Diseño e implementación del sistema electrónico.	Diseñar los circuitos de acoplamiento entre la etapa de control y los actuadores.
Elaboración del sistema de control y comunicaciones.	Elaboración de la etapa de control de los servomotores y del sistema de recepción y envío de señales.
Armado del prototipo, prueba y análisis de resultados.	Análisis y verificación del comportamiento final del prototipo construido y ensamblado, así como pruebas de comunicación en diferentes espacios.
Análisis de costos	Determinar los requerimientos y costos totales del proyecto, en cada una de las etapas.
Conclusiones	Se describen las principales conclusiones del proyecto desarrollado, derivado del análisis de los resultados.
Reporte final del proyecto y su presentación y defensa oral.	Se realiza el documento que integra el trabajo desarrollado, el cual describe todos los apartados anteriormente mencionados, se lleva a cabo la presentación y defensa oral del prototipo funcionando.

4. Conclusiones

Cumpliendo con los objetivos del proyecto, la impresora 3D funciona correctamente conforme a lo establecido. Para la aplicación seleccionada, falta mayor investigación en el área de desarrollo de una impresión 3D, ya que a manera de prueba es satisfactoria la impresión final, habiendo controlado todos los ejes y calculados correctamente las fuerzas ejercidas en el robot y los parámetros que se tienen que tomar en cuenta.

Referencias

[1] Wordpress. “Impresoras 3D”. http://www.impresoras-3d.info/historia-de-las-impresoras-3d/.
[2] Reyes C. F. “Robotica. Control de Robots Manipuladores”. S.A. Marcombo, Alfaomega. Barcelona, 2011.
[3] Ollero, B.A. “Robótica. Manipuladores y robots móviles” . S.A. Marcombo, Barcelona, 2007. Alfaomega.México. 2007

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

[4] Reyes C. F., Cid M.J., Vargas S.E. “Mecatrónica. Control y Automatización”. S.A. Marcombo, Alfaomega. Barcelona, 2013.
[5] Reyes C. F. “Matlab, Aplicado a la robótica y mecatrónica”. S.A. Marcombo, Alfaomega. Barcelona, 2012.
[6] Craig J. J. “Robótica”. Pearson Educación, tercera Edición, 2006, México.
[7] W. Stephen “Control Theory” McGraw-Hill Series in Electrical and Computer Engineering, 2008
[8] Hernandez, A. “Cinemática de Mecanismos. Análisis y diseño” Editorial Sintesis, primera edición 2004.
[9] Norton, L.R. “Diseño de elementos de Máquinas” Prentice Hall, Cuarta Edición, 2006.
[10] Norton, L.R. “Diseño de Maquinaria. Síntesis y análisis de Máquina y Mecanismos ” Prentice Hall, Cuarta Edición, 2009.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

4. Diseño y construcción de control de servo válvulas para turbina Coppus

Humberto Mancilla Alonso, Jorge Vázquez Cervantes, Millán Rosas César

humberto_6@hotmail.com, hellmillan@gmail.com

Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de estudios superiores Aragón
Av. Rancho Seco s/n, Col. Impulsora, Nezahualcóyotl, Estado de México, C. P. 57130, México.

Resumen

El presente artículo muestra el proceso de diseño de un tarjeta de control para una servo-válvula de una turbina Coppus, encargada de la toma de decisiones sobre el flujo de vapor que pasara a través de los alabes, controlando por consecuencia las revoluciones generadas. El proyecto integra el diseño mecánico de la válvula, así como este surge como una manera eficaz y económica de complementar el sistema de supervisión y adquisición de datos instalados en el ciclo Rankine, para poder automatizar y ser monitorizado en forma remota, siendo este un mejor método de enseñanza para prácticas de laboratorio dentro de la facultad de estudios superiores plantel Aragón.

Para el desarrollo del diseño se realizaron pruebas de funcionamiento satisfactorias que dieron por conclusión que el control es una opción viable para la implementación de las 4 válvulas disponibles, siendo mejorable en aspectos como lo son la robustez de programación y mejoramiento de instrumentación para asegurar la integridad de los alumnos.

Palabras clave: Control, servo válvula, turbina, ciclo Rankine, estabilización, generación de energía, Tarjeta de adquisición, regulación, etapa de potencia, microcontrolador, microchip, Coppus, automatización, simulación, programación c, encoder incremental, espacio de estados, instrumentación, modelado, comunicación, protocolo, motor DC, labVIEW, MATLAB, interrupción externa, PWM.

1. Introducción

El surgimiento de la necesidad de un control bien estructurado que cuide, regule y estabilice le energía generada por una turbina Coppus de manera remota y automatizada yace de la importancia del cuidado e integridad del alumnado y personal encargado del ciclo Rankine a automatizar, consecuente del objetivo principal de los programas PAPIME, que es el mejoramiento de la enseñanza de la ingeniería por parte de nuestra institución.

El desarrollo del proyecto implica el planteamiento y construcción de una tarjeta de control encargada de la toma de decisiones sobre el cierre, apretura y regulación de una serie de válvulas que se encuentran en un arreglo secuencial, dicha tarjeta implica varias etapas, desde la planeación, cálculo y simulación del control, su implementación en un microcontrolador, el diseño electrónico y eléctrico, hasta la interfaz de comunicación con el programa previamente desarrollado, que tiene por comisión la instrumentación de la turbina [1].

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

2. Metodología.

El diseño en ingeniería se puede definir como el proceso de aplicar las diversas técnicas y principios científicos con el propósito de definir un dispositivo, un proceso o un sistema con suficientes detalles que permitan su realización. El diseño puede ser simple o muy complejo, fácil o difícil, matemático o no matemático puede implicar un problema trivial o uno de gran importancia. No obstante, la complejidad de la materia por lo general requiere que el diseñador disponga de un conjunto de problemas estructurados paso a paso ideados para esclarecer un concepto o conceptos particulares relacionados con el tema particular. Es por ello que el presente artículo se basa en el método de diseño de Pahl y Beitz, a continuación se presenta la metodología que se busca seguir en el presente trabajo de investigación.

Figura 1. Diagrama de Metodología de diseño.

3. Necesidad

La facultad de estudios superiores plantel Aragón cuenta con un ciclo Rankine para el fin de proporcionar prácticas propias a la generación termoeléctrica, las cuales en la actualidad se desarrollan de manera convencional manipulando los equipos directamente con las manos, además de que las lecturas de las variables pertinentes se toman con cronómetros manuales y termómetros de mercurio, promoviendo que los errores de paralaje o mala interpretación de los instrumentos aumente de manera importante. Además de que posibles distracciones de los alumnos podrían exponerlos a situaciones que les provoquen lesiones, es por ello que se ha llegado a tomar la decisión de automatizar el ciclo, añadiendo un sistema de instrumentación y control gestionado por tarjetas de adquisición de datos.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Para el desarrollo del control de la revoluciones se diseñó una válvula capaz de ser manipulada por un motor de corriente directa [2], que consta de un encoder incremental, es por ello que es necesario la implementación algún método para gobernar la posición de dicha válvula convirtiéndola de un servo sistema.

3.1 Estudio de caso

Algunos de los elementos a considerar para la elección de método de control son:

La importación de la precisión, ya que cada una de las válvulas contribuye de manera significativa a la respuesta final del sistema debido al poco espectro de acción de los motores.

La estabilidad total del sistema es indispensable garantizarla durante el proceso de regulación esperado y en estados que lleven al borde variables inmiscuidas en este, provocando que el control sea necesariamente robusto.

Un punto primordial que determino la elección del tipo de control fue la poca información sobre el funcionamiento interno de la turbina, ya que durante pruebas de comportamiento de la válvula los requerimientos de corriente y voltaje fueron muy variables generando una necesidad de control sobre estas. Concluyendo que el método indicado para la regulación de las revoluciones fue una retroalimentación en espacio de estados.

Determinado el sistema como

$$\dot{x}[3x1] = Ax[3x3] + B([3x1]u[3x1] \quad (1)$$
$$y[3x1] = C[1x3]x[3x1] \quad (2)$$

Donde la ley de control será

$$u = k0w - k[1x3]x[3x1] \quad (3)$$

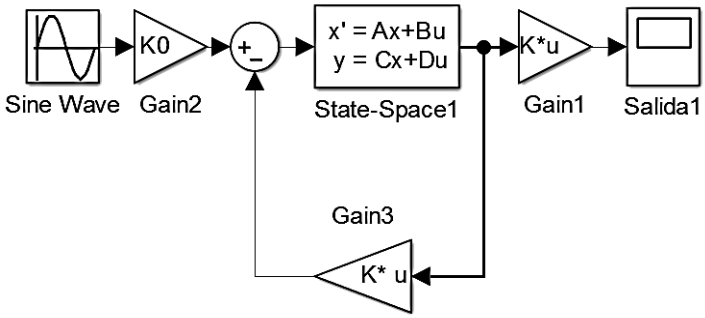


Figura 2. Diagrama de bloques de control

Finalmente se determinaron tres etapas elementales para solucionar el problema, una interfaz de usuario, un período de control electrónico y la etapa de potencia que cumpla con los requerimientos del motor y sus posibles alimentaciones limite.

3.2 Modelado

Durante el modelado se detectaron dos elementos a considerar, el motor y el elemento mecánico de la válvula, idealizando algunos aspectos que enseguida enlistare.

1. Perdidas mecánicas por encoder mínimas.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

2. El voltaje aplicado a la armadura del motor es proporcional a la velocidad del motor.
3. El modelo del motor solo consta de inercia.
4. El acoplamiento motor válvula es totalmente justo (no hay perdidas mecánicas por tolerancias excesivas).

Durante el modelado se obtuvieron 3 ecuaciones de comportamiento electromecánico.

Comportamiento de la aceleración

$$\ddot{\theta} = \frac{k}{J} + \frac{b\dot{\theta}}{J} \tag{4}$$

Comportamiento de la corriente

$$\frac{di}{dt} = \frac{V - k\dot{\theta}}{L} - \frac{R}{L} \tag{5}$$

Comportamiento de la velocidad

$$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt} \tag{6}$$

Voltaje V, velocidad $\dot{\theta}$, constante de armadura de motor k, constante de amortiguamiento b, y momento de inercia J, Resistencia interna del motor R, inductancia L

Al pasar esas ecuaciones al espacio de estados obtenemos.

$$\begin{bmatrix} \dot{x1} \\ \dot{x2} \\ \dot{x3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{J} & \frac{k}{j} \\ 0 & -\frac{k}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x1 \\ x2 \\ x3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} u(t) \tag{7}$$

Durante el análisis del sistema mediante la construcción de una matriz de controlabilidad y la posición de los polos, se demostró que este era estable y controlable aun cuando la variable se encuentre en puntos límite.

3.3 Simulación de control

Auxiliado de constantes aproximadas se obtuvo el siguiente sistema.

$$\begin{bmatrix} \dot{x1} \\ \dot{x2} \\ \dot{x3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0.2 & 100 \\ 0 & -100 & -20 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x1 \\ x2 \\ x3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 20 \end{bmatrix} u(t) \tag{8}$$

A partir del estudio de caso se decidió usar un sobrepaso máximo de 20% y un tiempo de asentamiento de 0.4 segundos, esto dato son usados por recomendación. El polo que se obtiene con estos datos es:

$$Re\{pD\} = \frac{5}{0.4} = 12.5$$

$$Im\{pD\} = \frac{-\pi(12.5)}{Ln(20)} = -13.1086$$

$$12.5 - 13.1086\, i$$

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Con el criterio de los polos dominantes

$$12.5 - 62.5\,i$$

Con el cual se calculara el vector de ganancias para cada una de las variables conocida como k [1X3] (ganancias de variables de retroalimentación). Además de la ganancia de alimentación de voltaje k0, según la ley de control.

Ayudados la paquetería MATLAB obtenemos los siguientes resultados:

$$k = [10.252 \quad -4.063 \quad 3.365]$$
$$k0 = 3.365$$

Bajos los parámetros calculados se obtuvieron las siguientes simulaciones de señal de salida (posición angular del motor) con solicitudes de posición alterna y un tren de pulsos respectivamente:

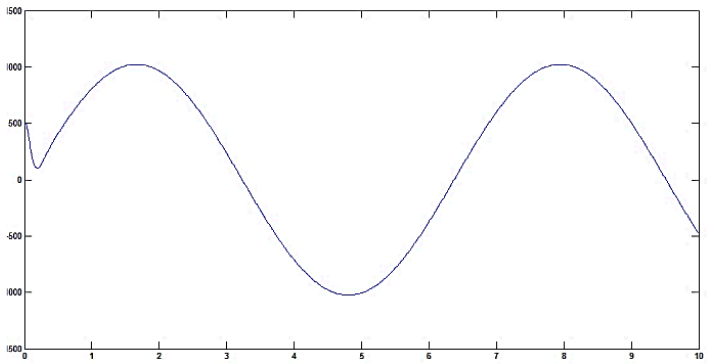


Figura 3. Simulación respuesta esperada alterna.

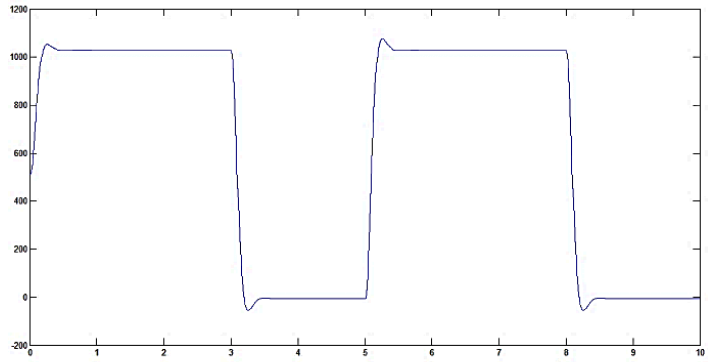


Figura 4. Simulación respuesta esperada pulsos.

Obteniendo muy buenos resultados por parte de la ley de control demostrando que la rasgos con los que se quería trabajar (Estabilidad y respuesta en estado estable) fueron bien calculados. Conjuntamente la simulación externo datos útiles para el diseño de la tarjeta, siendo que la alimentación de voltaje y amperaje están dentro del espectro de funcionamiento de motor seleccionado para controlar el elemento mecánico de la servo válvula.

3.4 Tarjeta de control

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

La selección del microcontrolador fue basada según el requerimiento de los periféricos:

- Número de salidas de control necesario para hacer pruebas con una solo servo válvula, es decir, las dos terminales de polarización (2 terminales CCP).
- Un pin de interrupción extrema y pin digital para llevar a cabo el conteo de encoder incremental y así conocer el avance del motor, así como su sentido de giro.
- Tres pines digitales para el manejo de la etapa de potencia (puente H).
- Un pin de lectura de señal analógica (Lectura del sensor de corriente).
- Un puerto de comunicación (Protocolo RS-232), con el cual se tendrá flujo de información con la paquetería del ordenador.

El PIC seleccionado para las pruebas fue 16f887 con un cristal de 20 MHz, dicho microcontrolador se programado con la paquetería PWC en CCS. Y simulado en ISIS Proteus.

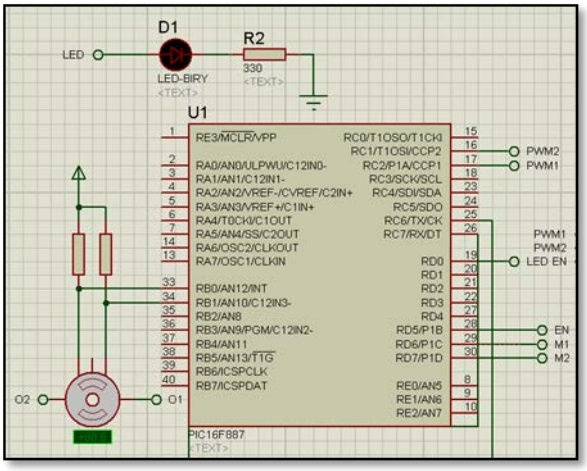


Figura 5. Simulación de Circuito

El programa que se implementó en el microcontrolador está basado en un testeo continuo del error que calcula la diferencia de posición requerida y posición actual, siendo esta operada por la ley de control y obteniendo como resultado la magnitud del “Duty” para las terminales PWM quienes alimentan controlaran y la posición y velocidad el motor.

La actualización de posición requerida será enviada por un programa desarrollado en LabVIEW el cual traducirá el número de revoluciones requerida a la posición del motor el cual está en función del encoder incremental, la recepción de dicha información por parte del microcontrolador será por interrupción por comunicación serial, mientras que el conteo del encoder se actualizara por interrupción externa.

El microcontrolador cuenta con vector interrupción jerarquizando la interrupción externa, opción necesaria pues la posición del motor es el elemento principal para el control diseñado, pausando por un ínfimo momento la recepción de información.

Antes de la construcción de la tarjeta de control se simulo la posible posición de cada uno de los elementos eléctricos y electrónicos con el fin de que esta sea la más óptima a la hora de las pruebas en sitio y si esta es configuración es viable para generación de las pistas. Durante esta simulación de tomo la decisión de construir una tarjeta de caras, ya que el número de pistas y su tamaño no permitía su implementación.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

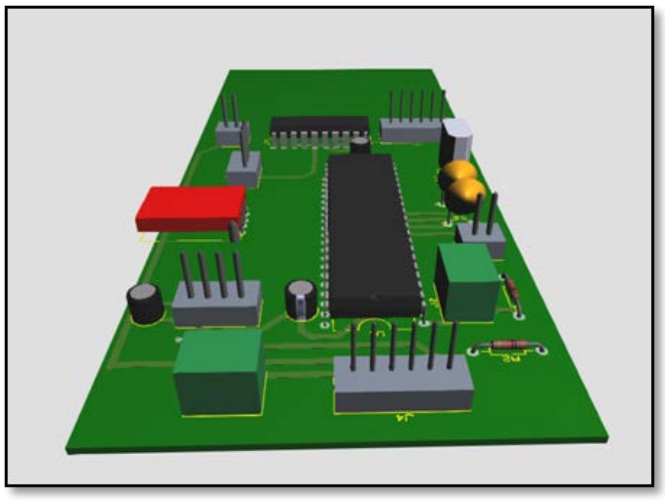


Figura 6. Simulación PCB

3.5 Resultado final

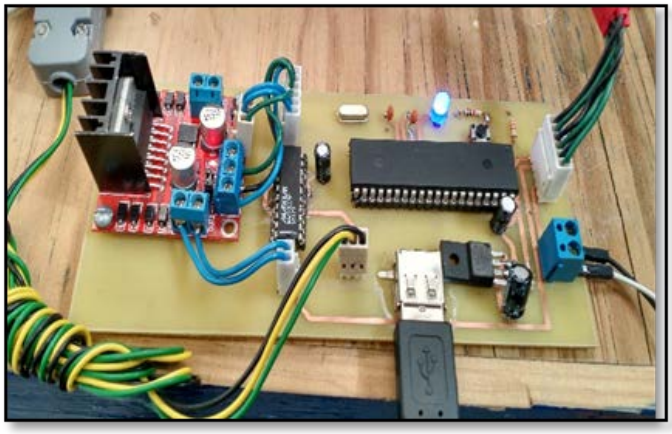


Figura 6. Tarjeta de control

4. Pruebas en funcionamiento

Una vez terminado el ensamble de la válvula se realizaron distintas pruebas de funcionamiento al dispositivo para comprobar la correcta interacción entre los elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos.

4.1 Pruebas en laboratorio

En primera instancia se realizaron dos pruebas de laboratorio sobre una mesa de pruebas manufacturada para ensamblar la válvula y poder contemplar los recorridos del vástago.

Para el primero fueron simples pruebas para revisar que no hubiera ningún atasco, controlando la posición entre los límites máximos y mínimos.

Finalmente se operó con dos mil ciclos en forma continua para constar el rendimiento del dispositivo mediante un uso constante, este último se repitió 2 veces más y en ninguno de estos hubo problema alguno.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

4.2 Pruebas en sitio

Se logró regular el flujo de vapor, pudiéndose elevar la velocidad de la turbina por encima de 4000 [RPM] sin carga y disminuirla hasta el cero total logrando los 2 objetivos de control (Regulación y estabilización), comprobando que el control de la servo válvula es funcional. La operación de la válvula duro aproximadamente una hora y media, con lo que se comprobó que la temperatura a la que se eleva no afecto la operación del servo motor o de la tarjeta controladora debido que la corriente requerida es suficientemente elevada.

5. conclusiones

El diseño de la tarjeta de control resulto ser perfectamente funcional y viable para poder extenderlo la construcción del control de las 4 válvulas, debido a una buena compatibilidad, al buen funcionamiento durante las 3 iteraciones de pruebas en sitio, por la fácil comunicación con la paquetería encargada de instrumentación del ciclo Rankine. Además los resultados funcionales con la regulación de la posición del elemento mecánico de la servo válvula expresaron pequeños problemas de fácil resolución, como lo es la creación de una subrutina de calibración, tener un retroalimentación visual de la posición en tiempo real y finalmente añadir robustez a la programación agregando detección de errores en lecturas de retroalimentación y un botón de paro de emergencia. Uno de los elementos fundamentales para la toma de esta decisión es el reducido costo de la producción de la tarjeta, siendo un estimado de $ 650 MNX solo el costo de los elementos de construcción, sin tomar en cuenta la manufactura y el trabajo de diseño.

Referencias

[1] Velázquez Garibay R.A. (2015). Diseño de una Servo válvula para turbina COPPUS. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de estudios Superiores Aragón.
[2] Carbajal .G. *Instrumentación virtual y Supervisión a distancia de una planta generadora*, (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de estudios Superiores Aragón

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

5. Instrumentación Virtual, Supervisión a distancia y Control para una planta Generadora de Energía

Mancilla Alonso Humberto, Carbajal Álvarez Gerardo, Vázquez Cervantes Jorge

humberto_6@hotmail.com, gerardo92_carb@hotmail.com, karenjvc@unam.mx.

Facultad de Estudios Superiores Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México.
Av. Rancho Seco s/n, Col. Impulsora, Nezahualcoyotl, Estado de México, C. P. 57130, México

Resumen

El presente trabajo es resultado del proyecto UNAM DGAPA PAPIME PE101614, consistente en la actualización del Laboratorio de Máquinas Térmicas de la FES Aragón, implementando un sistema de supervisión y adquisición de datos de un ciclo Rankine con la finalidad de mejorar la calidad de las practicas del Laboratorio, así como acercar a los alumnos de las áreas térmica y mecatrónica a la tecnología empleada en la industria. Se implementó una interfaz programada en LabVIEW y utilizando tarjetas de adquisición de datos para procesar las señales de los sensores requeridos, además de publicar la interfaz en internet para acceder a ella a distancia, asi como monitorear el estado de la planta también mediante dispositivos móviles como una Tablet.

Debido a las altas temperaturas y presiones, así como evitar accidentes y garantizar la seguridad del alumno, también se puede controlar la regulación del flujo de vapor en la turbina desde la interfaz activando una servoválvula, evitando el contacto directo del alumno con las zonas peligrosas. El sistema proporciona mejores herramientas para la realización de prácticas beneficiando a 560 alumnos en promedio por semestre de las áreas de térmica y mecatrónica.

Palabras clave: Automatización, Adquisición, servoválvula, Instrumentación Virtual, Instrumento Virtual

1. Introducción

En el proyecto del que emana este documento se analiza la necesidad de implementar un laboratorio con mejoras para elevar la calidad de la enseñanza de tópicos de termodinámica, así como garantizar la seguridad de los alumnos que participan en las prácticas. Se describe el equipo del ciclo Rankine con el que cuenta la FES Aragón y posteriormente la selección de sensores y tarjetas de adquisición de datos necesarios. Se desarrolla una interfaz en LabVIEW a la que se puede tener acceso a través de la red local y otra interfaz en una tablet que también permite monitorear el estado de las variables del sistema desde internet, dentro del mismo proyecto se diseñó y fabricó una servovalvula en la FES Aragon, la cual se activa desde esta interfaz.

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), de National Instruments es un sistema de programacion grafico diseñado para el desarrollo de distintas aplicaciones como es la adquisición de datos y el control de instrumentos.

La instrumentación Virtual es un concepto introducido por la compañía Nacional Instruments en el año1983, se define como el sistema de medición, análisis y control de señales físicas con un PC, al diseñar un instrumento en la PC surge el concepto de instrumento virtual.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Un Instrumento Virtual es un modulo software que simula el panel frontal de instrumentos de medida que, apoyándose en elementos Hardware accesibles por computadora (tarjetas de adquisición de datos) realiza una serie de medidas como si se tratase de un instrumento real, la diferencia entre un instrumento real y un instrumento virtual es que la función de los instrumentos virtuales son definidos por el usuario mientras que los instrumentos tradicionales tienen funcionalidad fija.

Mediante las pruebas realizadas, se demuestra que es viable la implementación de sistemas de adquisición de datos, los datos obtenidos se compararon con datos proporcionados de prácticas realizadas anteriormente, y se observó que las lecturas de temperatura tomadas con los termopares correspondían a los valores esperados dadas las condiciones de presión en cada estado.

2. Metodología

El Diseño en Ingeniería se puede definir como el proceso de establecimiento de requerimientos basados en las necesidades humanas, transformando estas necesidades en especificaciones y funciones,las cuales son convertidas en soluciones sujetas a restricciones aplicando las diversas técnicas y principios científicos con el propósito de definir un dispositivo, un proceso o un sistema con suficientes detalles que permitan su realizacion, Es por ello que el presente trabajo se basa en el método de diseño de Pahl y Beitz, a continuación en la figura 1 se presenta la metodología que se busca seguir en el presente trabajo de investigación y las actividades realizadas.

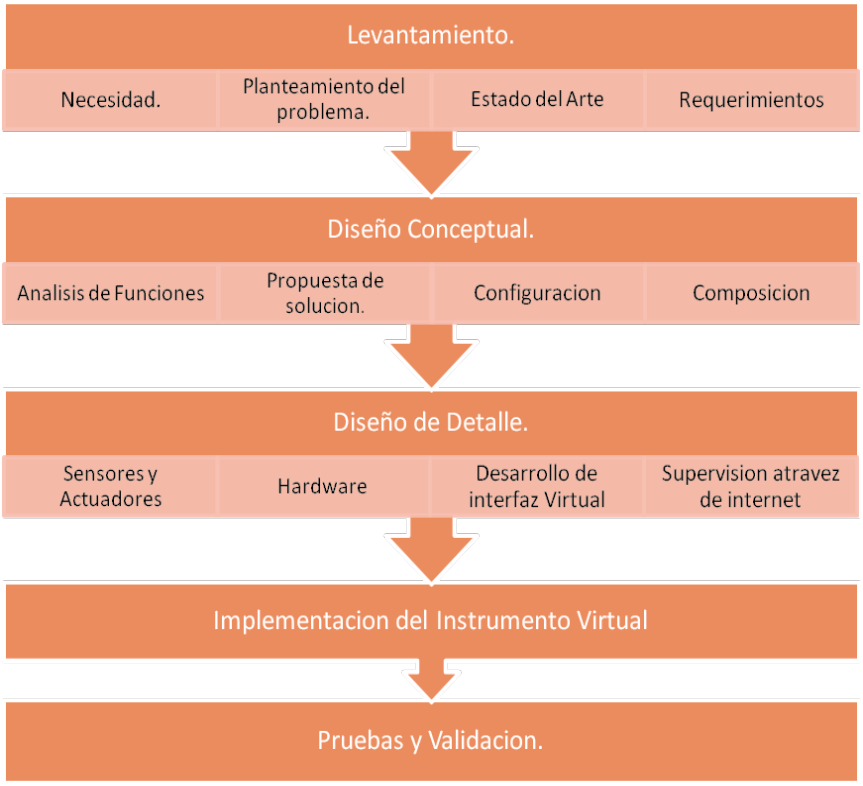


Figura 1. Diagrama de Metodologia y actividades realizadas en el proyecto

2.1 Levantamiento

En esta etapa se comienza por identificar y definir la necesidad que aqueja directamente a la población, el planteamiento del problema se define apartir de descubrir los inconvenientes limitaciones

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

u obstáculos por los cuales la necesidad no se ha satisfecho.El estado del arte también se incluye en esta sección y en él se abordan la forma en que se ha tratado de resolver el problema o el uso de tecnologías similares.

2.2 Diseño Conceptual

Se analizan las funciones que debe realizar el sistema, una función es una operación que se debe realizar para realizar una tarea principal, para este caso una función principal del instrumento Virtual es adquirir datos de variables físicas y mostrarlo en el panel frontal de la PC mediante una interfaz, una función secundaria puede ser supervisar esta interfaz atravez de internet.

La configuración de un sistema permite establecer la interacción física entre los diferentes subsistemas definiendo la posición de estos y asignando las funciones correspondientes, para este caso los subsistemas son sensores y actuadores, Hardware de adquisición y red de comunicación.

La Composición determina los elementos con los que se realizaran cada una de las funciones conformando una idea general de los componentes electrónicos y mecánicos que se requieren.en este caso la selección de sensores y tarjetas de adquisición de datos.

2.3 Diseño de Detalle

En esta etapa se procede a desarrollar la interfaz, se realizan los cálculos necesarios para procesar, acondicionar y filtrar las señales provenientes de los sensores, se configura el hardware de adquisición de datos DAQ, se crea una red para poder comunicar las DAQs y se publica en internet la interfaz para supervisarla a distancia.

Finalmente se procede a implementar el instrumento Virtual, se hacen las instalaciones eléctricas necesarias y se realizan varias pruebas para obtener resultados.

3. Levantamiento

3.1 Identificación de la Necesidad

La generación de energía eléctrica en México es un sector industrial vital, la mayor parte es producida por plantas Termoeléctricas, por lo cual la Ingeniería Mecatrónica y Mecánica consolidan su importancia y surge la necesidad de las instituciones educativas en instruir ingenieros con conocimientos en Diseño de sistemas Térmicos así como Sistemas de Supervisión y Control afines a los métodos actuales.

Actualmente las plantas termoeléctricas se basan en ciclos de conversión de energía térmica a trabajo mecánico mediante la potencia de vapor, debido a esto se implementan sistemas de Supervisión y Control Automáticos que facilitan las actividades entre los operadores y los equipos mecánicos y también aumentan la seguridad de los operarios ya que restringen la interacción con los equipos que podrían causarles daños a su integridad física debido a las altas temperaturas y presiones que se desarrollan durante la generación de vapor.

Dichos sistemas de supervisión y control son carentes en los equipos de laboratorios convencionales de las instituciones educativas que imparten el área térmica por lo que se genera un desfase entre la capacitación y la aplicación.

El laboratorio de Máquinas Térmicas de la Facultad de Estudios Superiores Aragón de la UNAM cuenta con equipo para proporcionar las prácticas relacionadas con la generación de energía eléctrica por medio de un ciclo Rankine.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

El desarrollo de dichas prácticas se realiza tomando notas en un cuaderno, utilizando los equipos directamente, realizando lecturas con instrumentos de aguja, termómetros de mercurio entre otros, dichas acciones restan eficiencia a la práctica e incluso la distracción delos alumnos podría causar accidentes como quemaduras por las altas temperaturas generadas durante la práctica. Por lo que surge la necesidad de actualizar los equipos de instrumentación y de monitoreo con los que cuenta el laboratorio de Maquinas térmicas.

3.2 Objetivo

Actualizar el laboratorio de Máquinas Térmicas implementando un sistema de adquisición de datos que permita supervisar el estado de las variables del ciclo Rankine mediante una interfaz que pueda ser visualizada a distancia y accediendo a ella a través de una red y mediante el uso de dispositivos portátiles así como acercar a los alumnos del área Térmica y de Mecatrónica a los SCADA utilizados en la industria.

3.3 Ciclo Rankine de la FES Aragón

El laboratorio de Máquinas Térmicas de la FES Aragón cuentan con un ciclo Rankine integrado por una Bomba de agua, un Generador de Vapor Clayton, un Sobrecalentador, una Turbina Coppus , un Generador Electrico de Corriente Continua y un Condensador acoplado a la salida de la turbina, se muestran a continuación en las figuras 2 3 y 4.

Figura 2. Generador de vapor o caldera del Ciclo Rankine del Laboratorio de Máquinas Térmicas de la FES Aragón

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Figura 3. Turbina Coppus acoplada al generador eléctrico al fondo puede observarse el sobrecalentador y en la esquina superior derecha el tanque de condensado

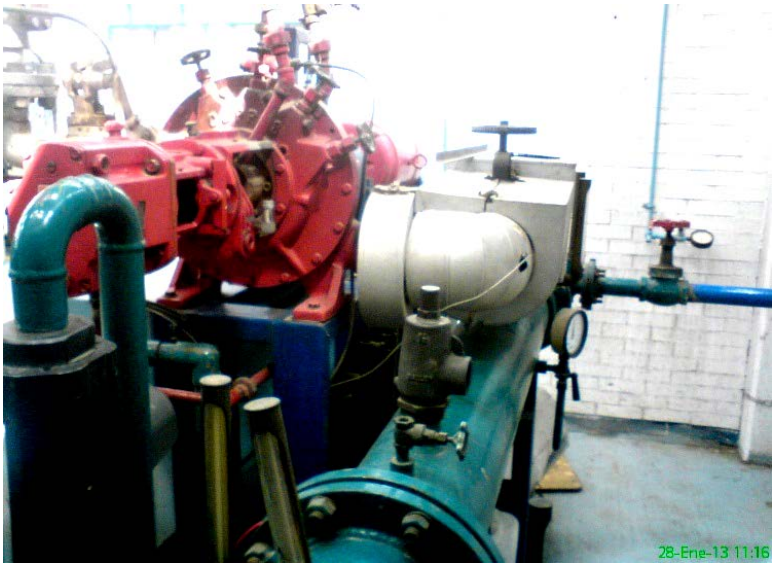


Figura 4. Condensador a la salida de la turbina Coppus

4.Propuesta de Solución

4.1 Selección de Sensores y Tarjetas de Adquisición de Datos

Los sensores estarán encargados de convertir esas variables físicas medidas en señales eléctricas analógicas, las tarjetas de adquisición de datos (DAQ) procesan, amplifican, acondicionan y filtran las señales obtenidas y las envían a la computadora.

Presión: se utilizarán sensores de presión piezoresistivos como los de la figura 5. Cuando estos se someten a una tensión mecánica, este dispositivo mecánico se deforma o flexiona por la exposición a

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

la presión, al ocurrir esto el material sufre cambios en sus características de resistencia eléctrica, esto provoca un cambio correspondiente en cualquier corriente eléctrica que pasa atravez del dispositivo que se trasduce en una medición de la presión.

Figura 5. Sensores de Presión Setra 522 de 0 a 10.34 bar, sensor de presión Setra 209 de 0 a -1.01 bar. Ambos de salida de 4 a 20 mA

Velocidad Angular: la medición de la velocidad angular se realiza mediante un encoder, como el de la figura 6, con resolución de 3600 pulsos por revolución.

Figura 6. Canal A B y Z de un Encoder Incremental y Encoder E508 de Autotonic para la velocidad angular del generador eléctrico.

Temperatura: para la medición de temperatura se utilizaron termopares del tipo J como el de la figura 7.Un termopar es un sensor de temperatura constituido por dos metales diferentes con la característica de que se produce una diferencia de potencial proporcional a la diferencia de temperaturas entre los puntos de unión de ambos metales.

Torque: la fuerza que se desea medir, deforma la galga extensiométrica. Y por medio de medidores de deformación (galgas) obtenemos una señal eléctrica con la cual podemos obtener el valor de la fuerza. Cuando se deforma el medidor de deformación la resistencia eléctrica cambia en proporción a la carga. Esto se logra por medio de un puente de Wheaststone.

Figura 7. Termopar Tipo J Fe — Constantan (CU-Ni)

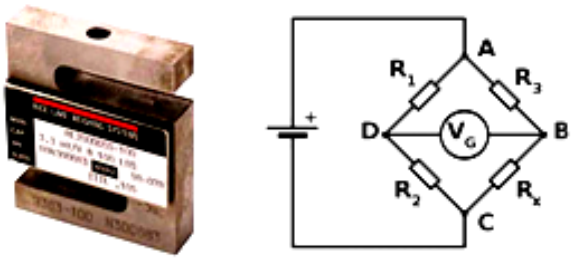


Figura 8. Puente de Wheaststone y de Carga Rice Lake 20000-B capacidad máxima 75 lb

Tarjeta de Adquisición de Datos NI 9213: es una tarjeta diseñada especialmente para la lectura de termopares. Cada canal cuenta con una impedancia, posteriormente la señal se amplifica, se filtra y es multiplexada para poder ser procesada atravez del convertidor Analogico Digital de 24 bits se muestra el diagrama en la figura 9.

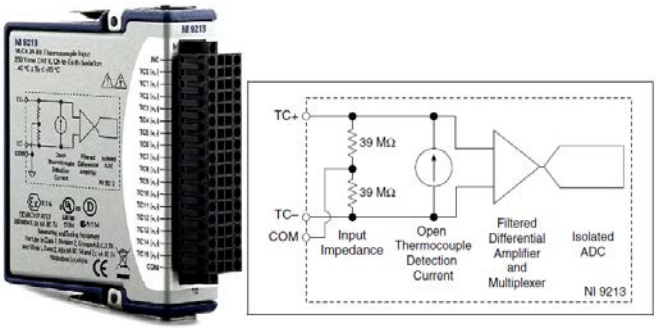


Figura 9. DAQ NI 9213 para termopares con su respectivo diagrama.

Tarjeta de Adquisición de Datos NI 9208: Con esta DAQ, se pretende adquirir los datos de todos los sensores de presión del ciclo, así como las lecturas de voltaje, corriente, velocidad angular y Torque que se tienen. Se muestra el diagrama interno en la figura 10.

Cada canal cuenta con una resistencia pull down de entrada entre los canales AI0,AI1,etc, y el COM, al circular la corriente por la resistencia habrá un voltaje en la entrada de los canales del Multiplexor, posteriormente la señal Multiplexada se amplifica para poder ser procesada a través del convertidor Analogico Digital de 24 bits. Ambas DAQ's cuentan con un módulo WiFi para comunicarse con la PC.

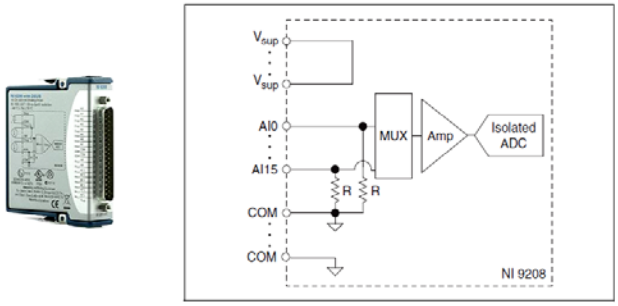


Figura 10. DAQ NI 908 para presiones, velocidad angular y carga, de entrada a corriente con su respectivo diagrama de procesamiento por canal

4.2 Desarrollo de la interfaz

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Para poder comunicar las DAQ's a la computadora fue necesario crear una red WiFi hospedada, la cual fue programada en *cmd* para poder ofrecer los protocolos de seguridad y conectar a ella varios dispositivos, en este caso dos DAQ's en lugar de usar un módulo Compact RIO, así la red asignaría una dirección IP diferente a cada DAQ comunicándose con la computadora. La interfaz fue programada mediante LabVIEW de National Instruments como se muestra en la figura 11, se usó el VI Express DAQ Assistan para obtener los datos de los canales de cada.

Un VI, (virtual instrument) es un programa desarrollado con la idea de hacer la función de un instrumento virtual, y a través de él conocer el estado de la variable de interés en un sistema, sin la necesidad de contar con un instrumento físico y con la ventaja de modificarlo de acuerdo a las necesidades de monitoreo. También se diseñó y fabricó una servoválvula para regular el flujo de vapor y su tarjeta controladora basada en un microcontrolador PIC, realizados por integrantes de este proyecto PAPIME, por eso se integró en la interfaz la manera de comunicarse con el PIC enviando los comandos necesarios al controlador de la servo válvula desde el panel de control en la PC.

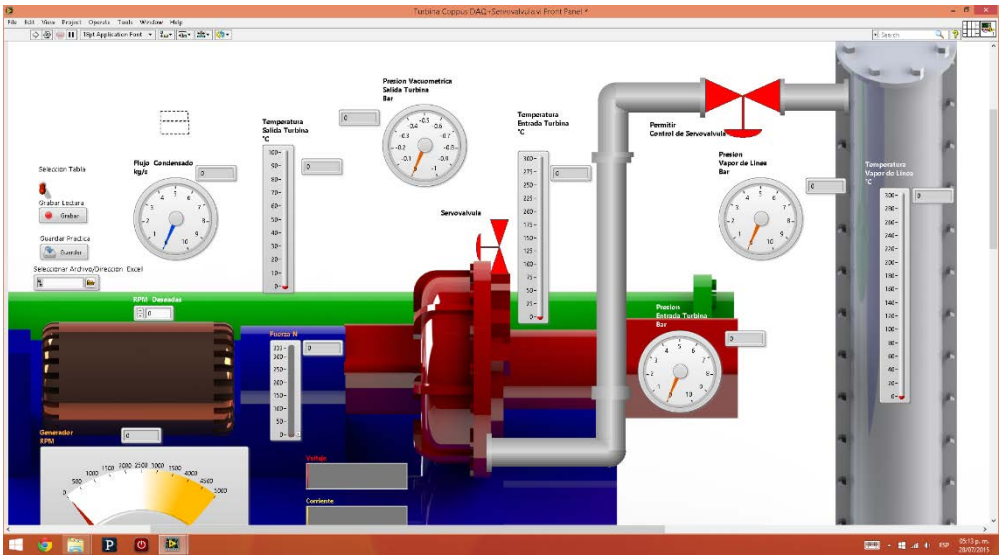


Figura 11. Interfaz de turbina Coppus en LabVIEW con control de Servo-válvula y adquisición de datos vía WiFi

La interfaz también elabora un reporte en Excel con los datos obtenidos de los sensores para posteriormente, con esos datos, calcular las propiedades del vapor, además se exportan los datos de los sensores atravez de variables compartidas que LabVIEW publica en un servidor al cual se puede tener acceso desde una Tablet con una aplicación llamada Data dash board en sistemas operativos Android como se muestra en la figura 12, así de esta manera se puede supervisar el estado de toda la planta Termoeléctrica desde una tablet y a distancia.

5. Resultados

Se instalaron los sensores en los puntos de instrumentación de la turbina Coppus como se muestra en la figura 14, se sustituyó una válvula manual por la servoválvula diseñada como se muestra en la figura 15 controlándola adecuadamente, se acondicionaron la señales de los sensores para su posterior visualización en el panel frontal de la PC, adquiriendo datos en tiempo real del ciclo rankine.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

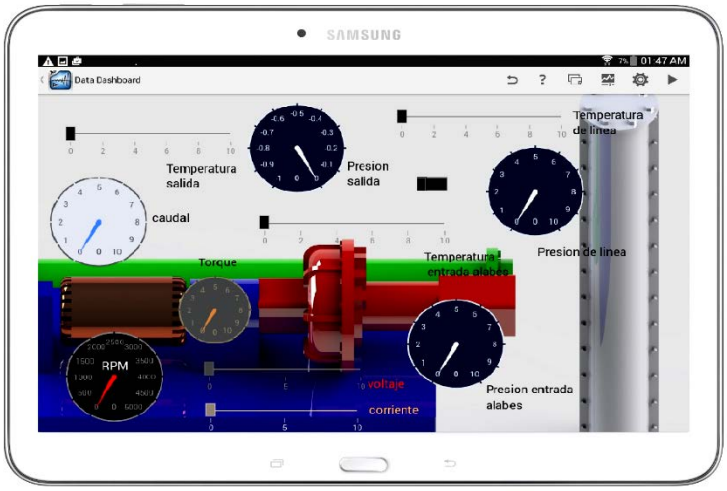


Figura 12. Interfaz de turbina Coppus en LabVIEW Data Dashboard para Android con control de

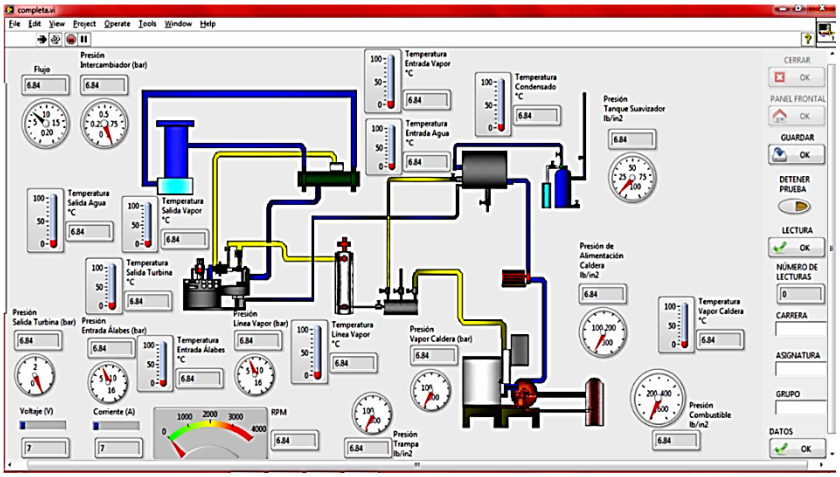


Figura 13. Primera Interfaz desarrollada de Ciclo Rankine Completo en LabVIEW

Figura 14. Instalación de los sensores en la turbina Coppus

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Figura 15. Instalación de servoválvula en turbina Coppus

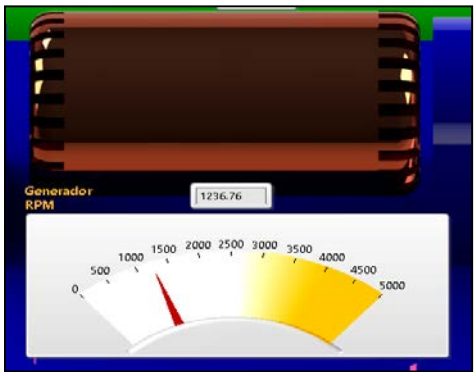


Figura 16. Medición en tiempo real de las revoluciones por minuto del generador Eléctrico.

Se adquirieron con éxito la medición de las variables físicas deseadas como son presión, temperatura, velocidad angular y torque, se compararon las lecturas de la interfaz con los instrumentos físicos del ciclo y se comprobó con exactitud que concordaban, se demuestra la reproducibilidad del proceso ya que se realizaron mediciones de la misma variable por métodos diferentes, asi como la precisión ya que se realizaron varios experimentos.

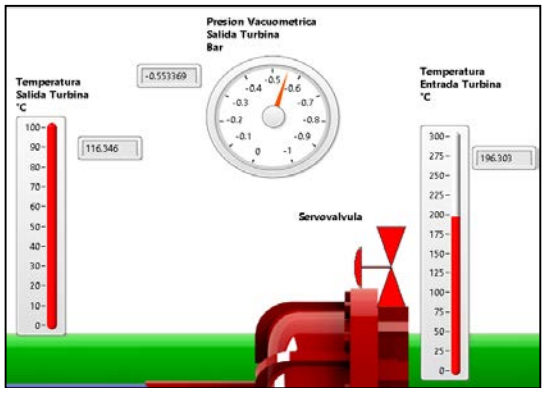


Figura 17. Medición en tiempo real de presión vacuometrica, temperatura de entrada a la turbina, temperatura de salida y activador de la servoválvula

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

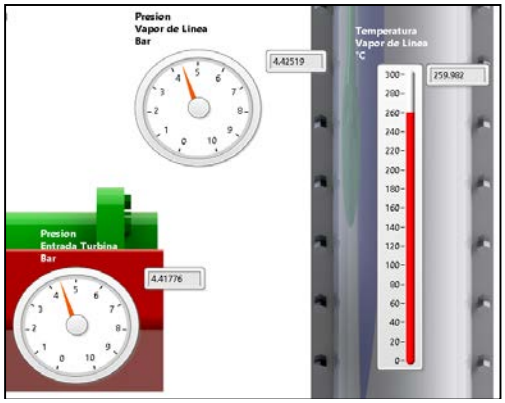


Figura 18. Medición en tiempo real de presión manométrica de entrada a la turbina y de línea, temperatura de línea.

Posteriormente este VI se publicó a través del Toolkit de LabVIEW: Web Publishing para visualizar el estado del Ciclo Rankine desde Internet como se muestra en la figura 19 y así cuando se dieran las prácticas del laboratorio los alumnos estarían monitoreando la práctica desde la seguridad de un centro de control a distancia del Ciclo y el Profesor tendría el control pleno de la aplicación, también se genera desde la interfaz un reporte de los datos adquiridos en una tabla de Excel con 6 pruebas realizadas bajo distintas condiciones estos datos permiten calcular las entalpias, entropías y propiedades del vapor siendo de suma importancia para el aprendizaje de tópicos de Termodinámica.

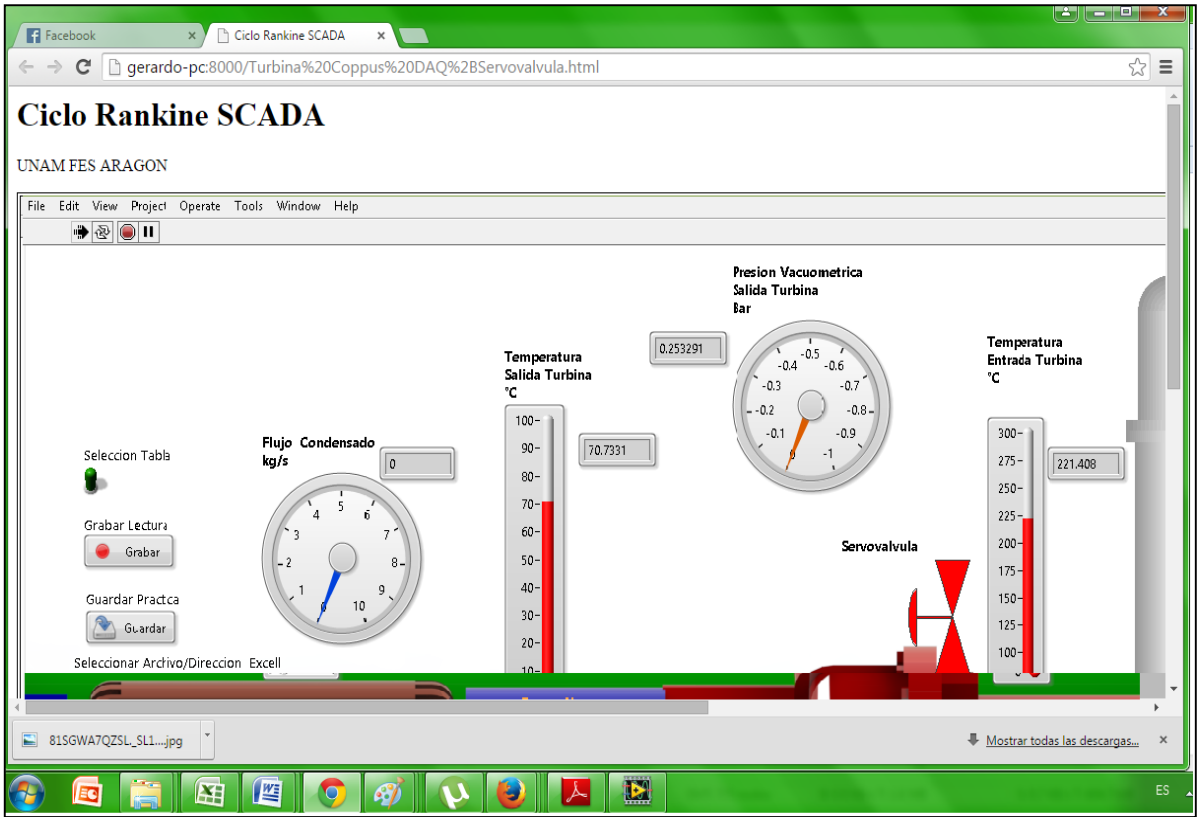


Figura 19. Monitoreo y publicación de la interfaz a través de internet

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Taba I. datos que exportó la interfaz a Excel

Línea		Entrada		Salida		Vel. Ang.
T °C	P bar	T °C	P bar	T °C	P bar	rpm
263.32	5.626	263.32	5.526	63.32	-0.965	4830
260.71	5.631	221.48	2.035	70.73	0.253	4435
259.98	4.425	196.3	4.417	116.34	-0.553	1236
257.52	4.404	257.52	3.904	127.52	-1.013	3380
251.72	4.381	251.72	3.981	151.72	-1.017	3930
245.92	4.044	245.92	3.044	145.92	-0.961	2480

6. Conclusiones

Los datos obtenidos de la interfaz a través de los sensores comparados con la instrumentación original del ciclo concuerdan perfectamente.

Se logró visualizar la interfaz a través de internet y supervisar la planta mediante dispositivos móviles en tiempo real, permitiendo de esta manera la enseñanza a distancia. Estableciendo así la posibilidad de ofrecer el uso de esta aplicación a otras instituciones carentes de laboratorios e interesadas en la enseñanza de los temas de generación de energía eléctrica. Este sistema permite acercar a los alumnos de mecatrónica y de térmica a los sistemas SCADA empleados en la industria y mejorar la calidad de la enseñanza en los laboratorios de máquinas térmicas.

La activación de la servoválvula a través de la interfaz elimina el contacto del alumno directamente con el equipo desapareciendo el riesgo de quemaduras o de accidentes dentro del laboratorio.

Agradecimientos a UNAM DGAPA por el apoyo al proyecto PE101614.

Referencias

[1] Nicolás S. A. *Sistema de supervisión y Adquisición de datos para un ciclo Rankine* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Aragón. (2013)

[2] Velázquez R.A. *Diseño de una servoválvula para una turbina Coppus* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Aragón. (2015).

[3] Carbajal .G. *Instrumentación virtual y Supervisión a distancia de una planta generadora*, (Tesis de licenciatura inédita) Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Aragón. (2015).

[4] Millán Rosas C. *Diseño y construcción del módulo de control de una Servoválvula.* (Tesis de licenciatura inédita). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de ingeniería. (2015).

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

6. Diseño Virtual de un Robot Paralelo tipo Delta

Mancilla Alonso Humberto, Macedo Chagolla Fernando, Alcántara Medina Luis

humberto_6@hotmail.com, alcantar_me@hotmail.com

Facultad de Estudios Superiores Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México.
Av. Rancho Seco s/n, Col. Impulsora, Nezahualcoyotl, Estado de México, C. P. 57130, México.

Resumen

En el presente trabajo se reporta el modelo virtual de un robot paralelo tipo delta conservando su configuración original, utilizando el software de diseño asistido por computadora DS SolidWorks®. Se obtuvo la solución de la cinemática inversa correspondiente y se implementó en la plataforma NI LabVIEW. Finalmente se conectó virtualmente el ensamble 3D elaborado en SolidWorks a la plataforma NI LabVIEW utilizando instrumentos virtuales de movimiento del módulo NI SoftMotion, permitiéndonos visualizar movimientos en el robot, además de probar y verificar la cinemática inversa sin la necesidad de trasladar el diseño a un prototipo físico.

Palabras clave: SolidWorks, LabVIEW, Virtual, Robot Paralelo.

1. Introducción

Los ingenieros y científicos usan generación de prototipos virtuales para diseñar, optimizar y visualizar sus productos digitalmente y evaluar diferentes conceptos de diseño antes de realizar gastos en prototipos físicos. La plataforma NI LabVIEW es una herramienta sencilla e intuitiva, la cual permite llevar a cabo la integración con plataformas como lo es SolidWorks. A raíz de este tipo de integraciones virtuales, se logra diseñar prototipos y llevar a cabo validación virtual, de tal forma que este tipo de procesos se vuelven mas efectivos.

El inicio de este proyecto se dio a partir de observar que instituciones de educación superior públicas en México que ofrecen formaciones afines con la enseñanza de la Ingeniería Mecatrónica, en ciertas ocasiones, carecen de infraestructura en laboratorios o de suficientes recursos económicos que impide cumplir con los objetivos académicos. Uno de estos objetivos es trasladar prototipos desarrollados en clase a una plataforma visual, desafortunadamente el alumno no siempre cuenta con los recursos o el tiempo suficientes para la fabricación de un prototipo físico que le permita principalmente visualizar su modelo. Sin embargo muchas de las instituciones educativas cuentan con plataformas de software como: NI LabVIEW y SolidWorks.

Mediante la integración de ambas, a lo largo de este proyecto se propone una integración virtual que proporcione una herramienta de apoyo en las metodologías de diseño impartidas en las instituciones educativas y así poder contribuir en el proceso de la enseñanza de Ingeniería Mecatrónica. Utilizando como caso de estudio la configuración de un robot paralelo tipo delta, se comenzó con el diseño mecánico de los distintos componentes del robot, en esta parte se concretó el diseño de los componentes y se describieron a detalle para una posible fabricación en trabajos futuros, de igual forma se preparó el ensamble cómo lo indica [1] para una correcta integración con el software LabVIEW. En la segunda etapa del proyecto se obtuvo la solución de la cinemática inversa [2] y se implementó en la plataforma NI LabVIEW. Finalmente se desglosó el proceso de integración de las dos plataformas de

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

diseño NI LabVIEW® de National Instruments y el software DS SolidWorks® Corp. para la generación de prototipos virtuales. Habiendo hecho esto se visualizaron movimientos en el robot, además de verificar la cinemática inversa sin la necesidad de trasladar nuestro diseño a un prototipo físico. Hasta el momento se describió de manera general el contenido del artículo, a continuación se detallara cada una de las etapas del proyecto mencionadas anteriormente.

2. Metodología del proyecto.

El diseño en ingeniería se puede definir como el proceso de aplicar las diversas técnicas y principios científicos con el propósito de definir un dispositivo, un proceso o un sistema con suficientes detalles que permitan su realización. El diseño puede ser simple o muy complejo, fácil o difícil, matemático o no matemático puede implicar un problema trivial o uno de gran importancia. No obstante, la complejidad de la materia por lo general requiere que el diseñador disponga de un conjunto de problemas estructurados paso a paso ideados para esclarecer un concepto o conceptos particulares relacionados con el tema particular [3]. Es por ello que el presente trabajo de investigación se basa en el método de diseño de Pahl y Beitz, a continuación se presenta la metodología que se busca seguir en el presente trabajo de investigación.

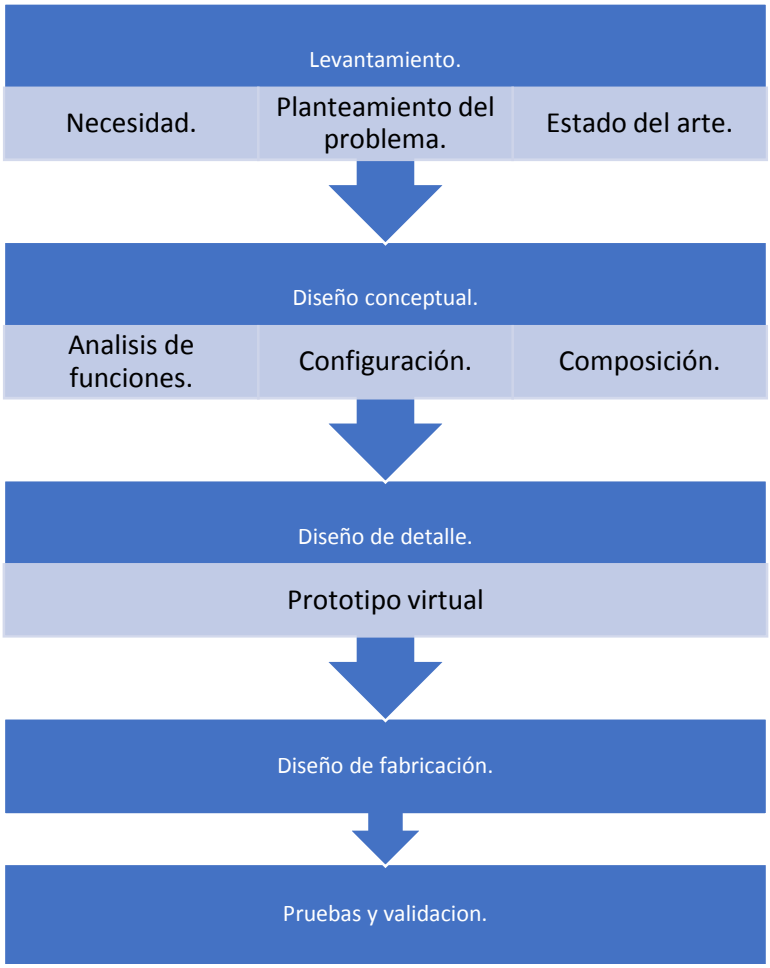


Figura 1. Diagrama de metodología de diseño.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

3. Diseño Mecánico con SolidWorks.

En esta etapa de diseño, las distintas propuestas de solución se concretaron en soluciones únicas y se describieron con el detalle necesario para su posterior implementación. La fabricación de los componentes del robot no se encuentra en los alcances del trabajo de tesis, sin embargo su diseño a detalle se desglosó con la intención de incorporar al ensamble aspectos como dimensiones exactas de cada uno de los componentes, material y otros aspectos que nos proporcionaron un ensamble ideal para la simulación además como un antecedente para tener la posibilidad de retomar el trabajo e implementarlo en un futuro. Debido a la geometría del robot paralelo tipo delta se podrán describir los componentes de una sola cadena cinemática ya que las otras dos cadenas cuentan con los mismos componentes mecánicos.

La plataforma fija también llamada base soporta los actuadores, además de él penden las tres cadenas cinemáticas que componen al robot, la geometría seleccionada se muestra en CAD resaltada en gris en la figura 2.

Figura 2. Plataforma Fija.

La plataforma móvil es la que sufre los mayores desplazamientos, debe ser ligera para reducir el peso del robot y aumentar la carga útil. La geometría favorece a un correcto acoplamiento con los tres paralelogramos que componen a los tres antebrazos. La geometría seleccionada se muestra en CAD resaltada en gris en la figura 3.

Figura 3. Plataforma movil.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

El brazo es el componente que recibe el movimiento de los motores, la geometría del brazo seleccionado favorece al acoplamiento con los motores, cuidando que no exista desplazamiento entre el eje del motor y el eje de giro de del brazo. El brazo esta acoplado con un componente que sirve de flecha articular y a su vez permite el montaje y desmontaje de un actuador, estos componentes a su vez se encuentran sujetos de un soporte empotrado en la parte superior de la plataforma fija como se muestra en la figura 4.

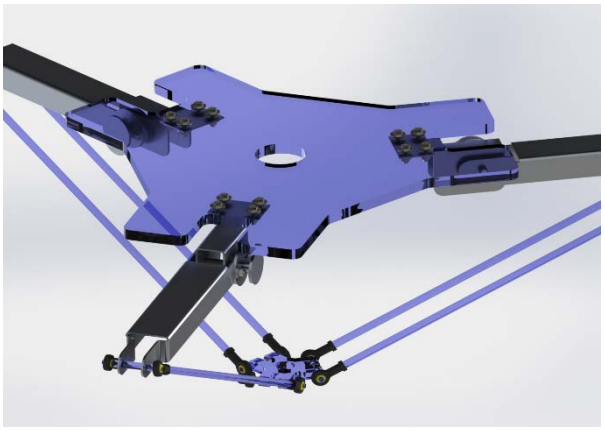


Figura 4. Brazo.

La configuración del robot paralelo tipo delta elegida como caso de estudio tiene como idea básica un paralelogramo, este permite que un eslabón de salida (antebrazo) permanezca en orientación fija con respecto a un eslabón de entrada (brazo). El uso de tres paralelogramos restringe completamente la orientación de la plataforma móvil que permanece con únicamente 3 grados de libertad como lo indica [4]. La composición del paralelogramo está formada por dos varillas acopladas adecuadamente a unas rotulas, favoreciendo el desempeño del mecanismo de cuatro barras que forma el paralelogramo, la geometría seleccionada se muestra en CAD resaltada en gris en la figura 5.

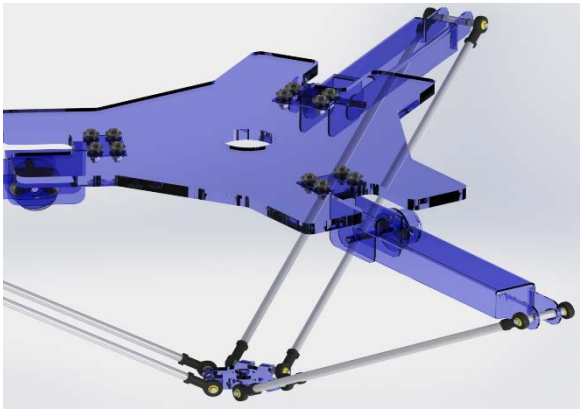


Figura 5. Antebrazo.

4. Implementación de la cinemática inversa en la plataforma NI LabVIEW

La programación de la cinemática inversa se realizó utilizando la estructura de programación Formula Node de LabVIEW, esta es una conveniente estructura de programación basada en texto que se puede usar para ejecutar operaciones matemáticas en un diagrama de bloques usando sintaxis de lenguaje basado en texto.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

La Figura 6 muestra el diagrama de bloques en LabVIEW donde se programó la cinemática inversa del robot, con la cual el vector de posición “p” de la plataforma móvil es dado y la solución nos arroja los ángulos de las juntas θ_{11}, θ_{12} y θ_{13} requeridas para llevar a la plataforma móvil al punto deseado, si en determinado momento se introduce un vector de posición el cual no es capaz de alcanzar el robot, el programa en LabVIEW arrojará una notación NaN (Not a Number) en lugar de un ángulo lo cual significa que no existe una solución para dicho vector de posición. Las variables de entrada corresponden al vector de posición y parámetros dimensionales del robot y las variables de salida corresponden a los ángulos θ1, θ2 y θ3 de cada una de las tres cadenas cinemáticas del robot.

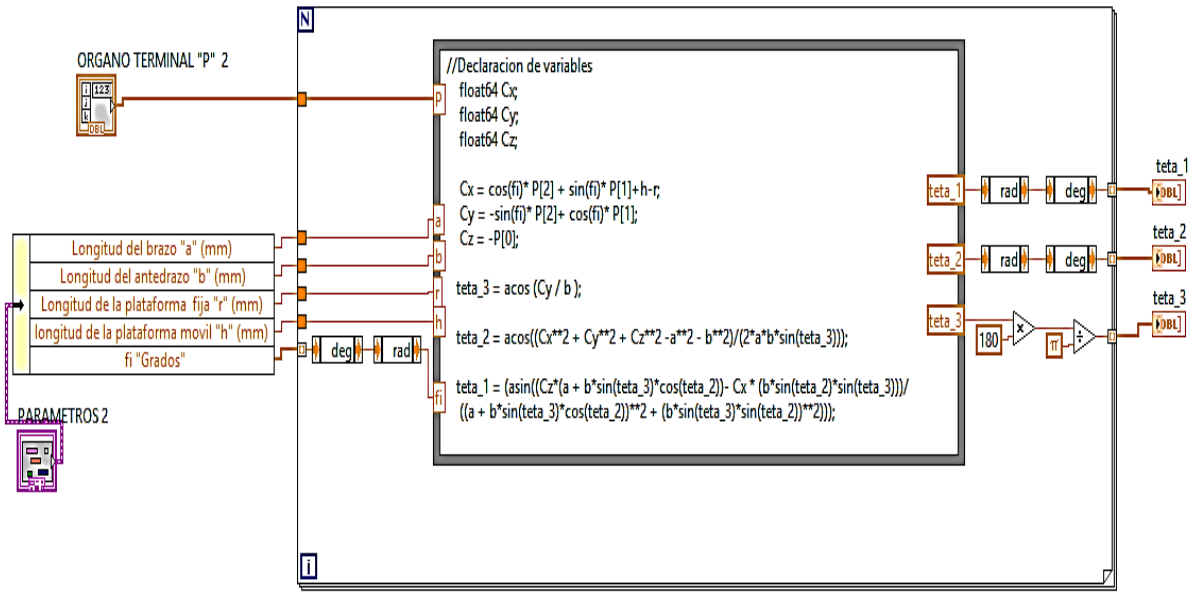


Figura 6. Diagrama de Bloques.

En la interfaz de usuario se puede observar cada una de las variables involucradas, la Figura 7 muestra la interfaz desarrollada en LabVIEW. La interfaz permite al usuario ingresar por medio de controles numéricos el vector de posición “p” para la posición de la plataforma móvil. De igual manera permite ingresar los parámetros de Longitud de brazo “a”, longitud del antebrazo “b”, longitud del centro de la plataforma fija al eje de giro del brazo “r”, longitud del centro de la plataforma móvil al eje de giro del antebrazo “h”, el valor de Ø (fi), y al correr el programa nos arroja en indicadores numéricos el resultado de θ1, θ2 y θ3 correspondientes a cada una de las tres cadenas cinemáticas del robot.

5. Integración virtual del ensamble 3D a la plataforma NI LabVIEW.

Los prototipos virtuales (también llamados prototipos digitales) ofrecen la habilidad de visualizar y optimizar un diseño, y evaluar diferentes conceptos de diseño antes de incurría en la fabricación de prototipos físicos. La estrecha integración del módulo LabVIEW NI SoftMotion y el software DS SolidWorks ofrece un entorno de diseño que es ideal para la generación de prototipos virtuales. Esta herramienta nos permite conectar fácilmente modelos existentes en SollidWorks CAD a LabVIEW. La integración de simulación de movimiento con CAD simplifica el diseño pues la simulación usa información ya existente en el modelo CAD, tales como puntos de contacto, acoplamientos y propiedades de masa del material. En la figura 8 se muestra un esquema que define en lo general la integración virtual.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

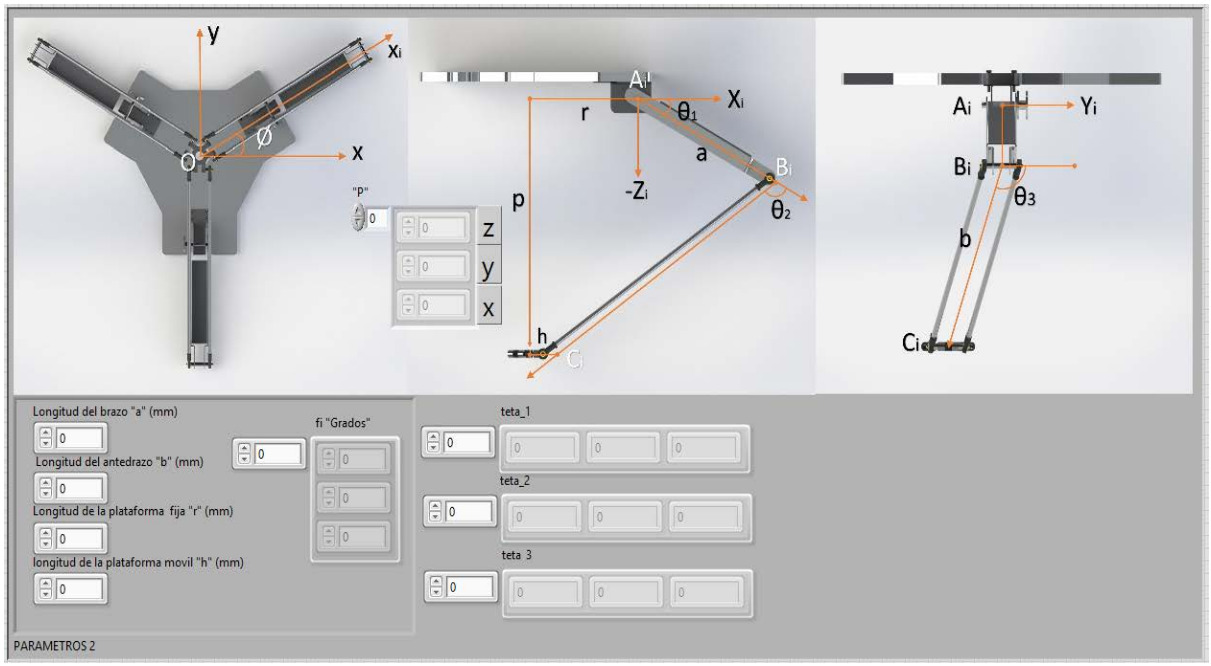


Figura 7. Interfaz en LabVIEW de la cinemática inversa.

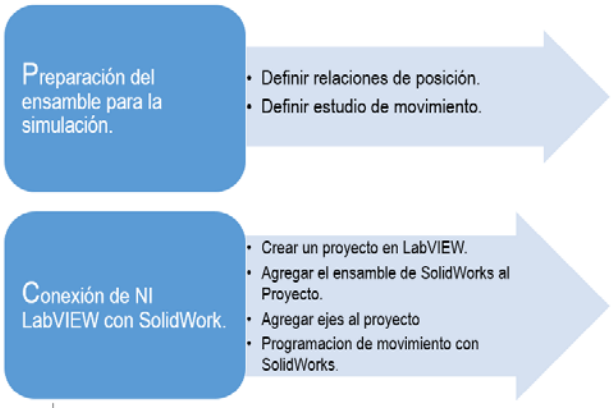


Figura 8. Esquema para la integración virtual.

5.1 Preparación del ensamble para la simulación

Para lograr una correcta integración entre LabVIEW y SolidWorks es necesario preparar el ensamble que ha de ser simulado, en concreto se tuvieron que definir las relaciones de posición necesarias en el robot, que definieran las direcciones permisibles de movimiento que debe tener el robot. *Las relaciones de posición crean relaciones geométricas entre los componentes de un ensamble. A medida que se agregan las relaciones de posición, se definen las direcciones permisibles del movimiento lineal o rotacional de los componentes. Se puede mover un componente dentro de sus grados de libertad, visualizando el comportamiento del ensamble.*

De igual manera se definió un estudio de movimiento, los estudios *de movimiento son simulaciones graficas de movimiento para modelos de ensamble. En un estudio de movimiento se utiliza MotionManager, la interfaz con escala de tiempo que incluye tres herramientas de estudio de movimiento, que son: Animación, Movimiento básico y Análisis de movimiento.*

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Para la comunicación entre LabVIEW y SolidWorks es estrictamente necesario utilizar la herramienta Análisis de Movimiento. Esta herramienta (disponible con el complemento SolidWorks Motion en la versión SolidWorks Premium) se utiliza para simular y analizar en un ensamble los efectos de elementos de movimiento (incluyendo fuerzas, resortes, amortiguadores y fricción). Por tanto, las restricciones de movimiento, las propiedades de materiales, la masa y los contactos entre componentes se tienen en cuenta en los cálculos realizados por el solver cinemático de SolidWorks Motion.

La configuración del robot paralelo tipo delta utiliza tres juntas de revolución que corresponden a los tres actuadores rotatorios da las tres cadenas cinemáticas. Para la creación de un motor se requiere especificar el tipo de motor a utilizar que en este caso es un motor rotatorio, para la localización del motor se selecciona una superficie cilíndrica o un borde circular, en la figura 9 se observa en color azul y una flecha roja que indica la localización del motor virtual. Todo motor configurado en SolidWorks debe ser estrictamente un motor tipo distancia para su correcta integración con LabVIEW, los parámetros de tiempo no son considerados en la simulación con LabVIEW.

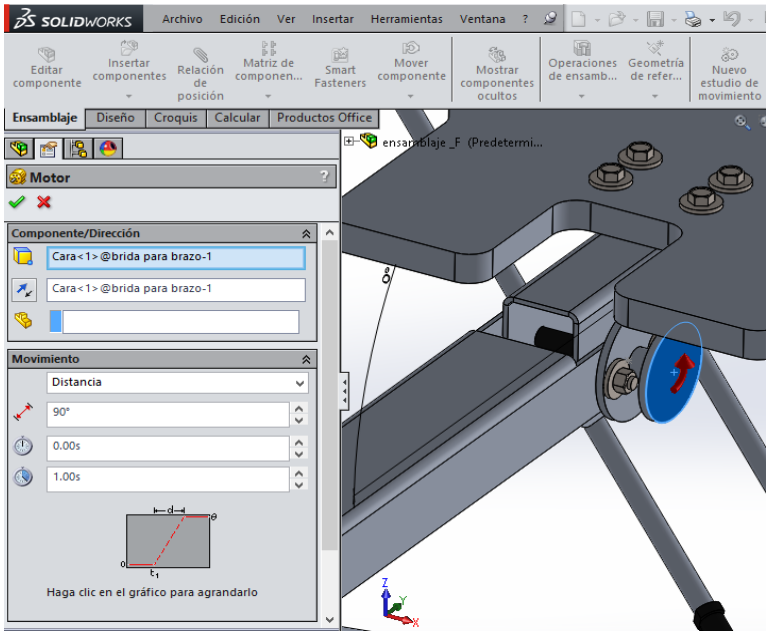


Figura 9. Creación de un motor rotatorio en SolidWorks.

5.2 Conexión de NI LabVIEW con SolidWorks.

El siguiente paso fue agregar el ensamble de SolidWorks a un proyecto de LabVIEW, es decir importar información del ensamble al proyecto. Se abrió un nuevo proyecto en LabVIEW y se realizó lo correspondiente para agregar en ensamble al proyecto como lo indica [1].

Para simular usando los motores de SolidWorks incluidos en el modelo, se necesitan asociar estos motores con ejes de NI SoftMotion. Los ejes de NI SofMotion son usados cuando se crean nuevos perfiles de movimiento usando los bloques funcionales de NI SoftMotion. En el proceso de agregar los ejes de NI SoftMotion al proyecto, los tres motores virtuales agregados en SolidWorks se vinculan automáticamente. El robot paralelo tipo delta consta de tres actuadores, en la Figura 10 podemos observar la ventana correspondiente al proyecto donde fueron agregados los tres motores rotatorios creados en SolidWorks y los tres ejes NI Softmotion asociados a cada uno de ellos.

Las funciones de movimiento para la simulación con el ensamble de SolidWorks se crean usando los NI SoftMotion VIs de la paleta de funciones NI SoftMotion. El modulo NI SoftMotion cuenta con estos bloques funcionales capases de construir perfiles de movimiento que contengan una serie de desplazamiento secuenciales o concurrentes, constituidos de movimientos multiaxiales en línea recta,

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

movimientos en contorno, de arco, e incluso movimientos complejos usando engranajes y levas electrónicas.

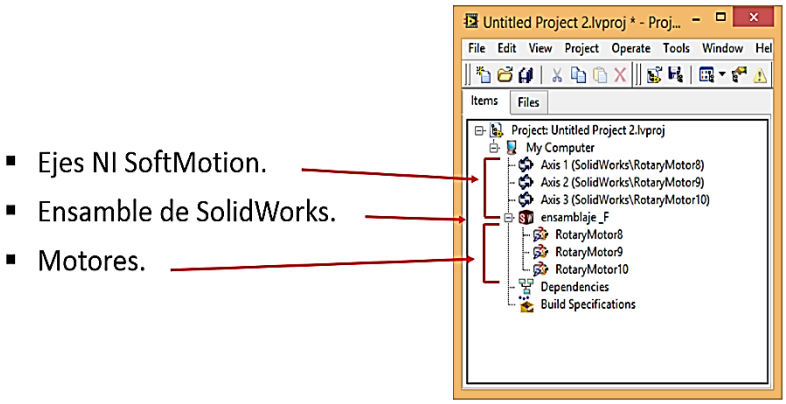


Figura 10. Ventana del proyecto con el ensamble de SolidWorks y ejes de NI SoftMotion.

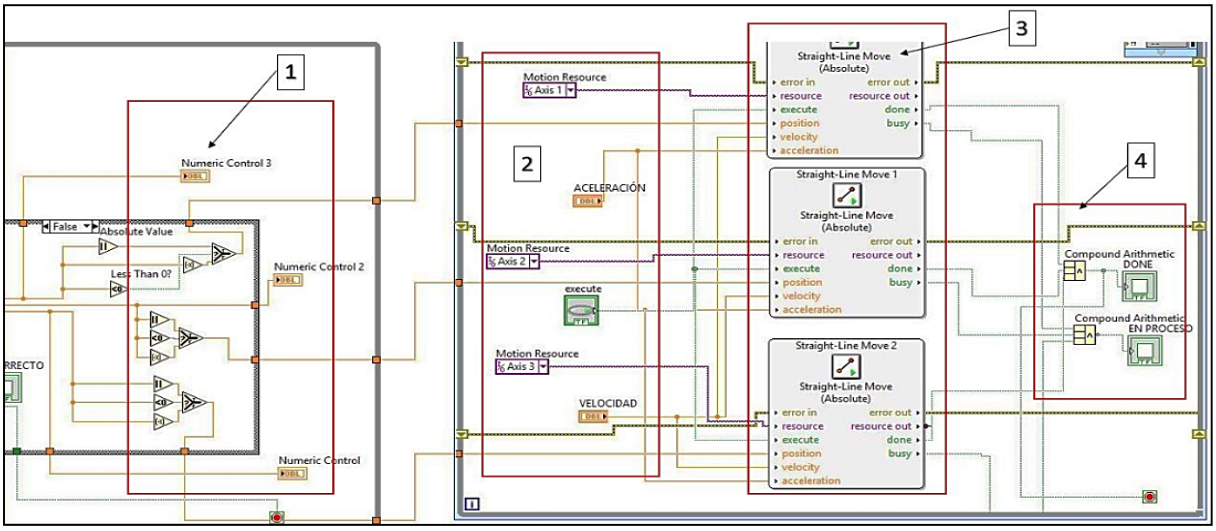


Figura 11. VI de funciones de movimiento.

La figura 11 muestra el VI que incorpora las funciones de movimiento del módulo NI SoftMotion para la simulación del robot. A continuación se describen las partes mostradas en la figura.

1.- En esta parte se muestran las tres variables de salida que se obtuvieron de la solución de la cinemática inversa, es decir los ángulos de las juntas θ_{11}, θ_{12} y θ_{13} correspondientes a los tres motores del robot y requeridas para llevar a la plataforma móvil al punto deseado.
2.- En esta parte del VI se muestran las entradas de las funciones de movimiento las cuales son: posición, (los ángulos de las juntas θ_{11}, θ_{12} y θ_{13}) velocidad, aceleración, los tres ejes de NI SoftMotion agregados al proyecto asociados a los motores creados en el ensamble, y el control execute.
3.- Aquí se muestran las tres funciones de movimiento Straigth-Line Move, encargadas del movimiento de los tres motores rotatorios del robot, dichas funciones de movimiento están conectadas en paralelo y configuradas para tener un movimiento absoluto.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

4.- En esta parte se muestran las salidas de las funciones de movimiento las cuales son dos indicadores boléanos. Uno nos indica que la simulación está en proceso y el otro cuando la simulación ha concluido.

Finalmente la figura 12 muestra una imagen de la simulación en proceso, se puede observar la interfaz de usuario, el proyecto de LabVIEW, y el ensamble de SolidWorks.

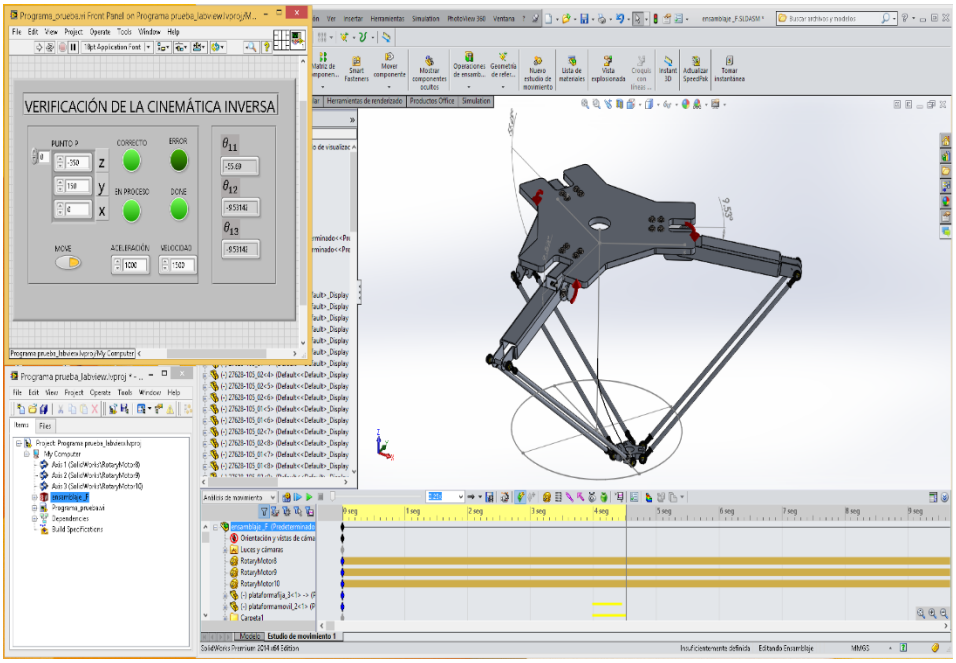


Figura 12. Simulación en proceso.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

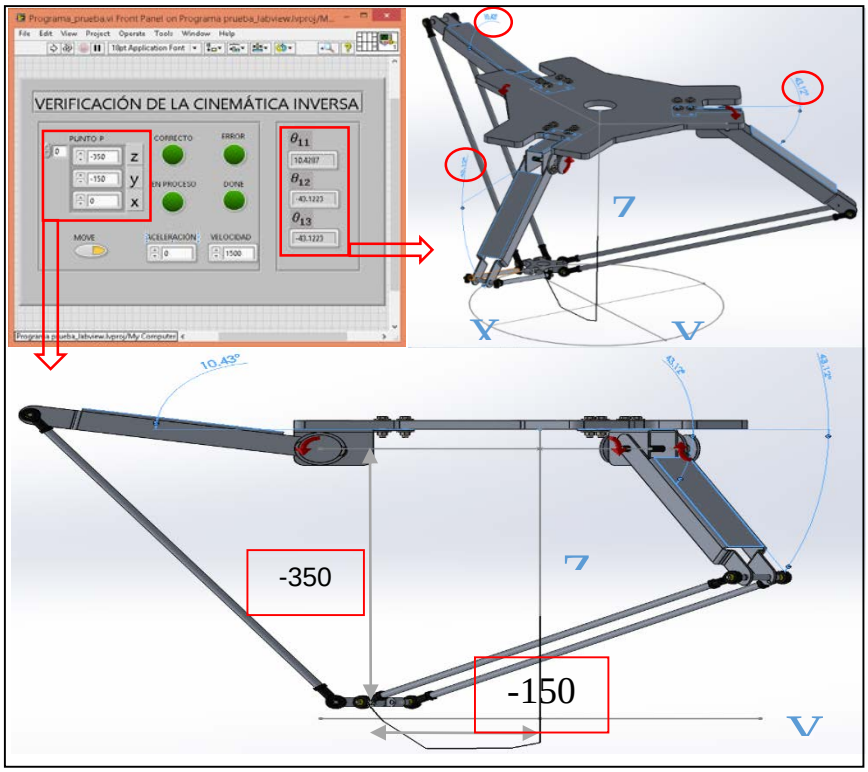


Figura 13. Verificación de la cinemática inversa.

6. Conclusiones

La integración de dos plataformas de diseño: NI LabVIEW® de National Instruments y el software DS SolidWorks® Corp para le generación de prototipos virtuales demostró ser útil para la visualización y verificación de la cinemática inversa, como se mostró en los resultados.

La integración de dichas plataformas, mostró ser una herramienta de apoyo o como una opción para las metodologías de diseño impartidas en las instituciones de educación superior ya que permitiría trasladar diseños realizados en el aula a una plataforma visual sin la necesidad de incurrir en prototipos físicos.

Existiría un impacto favorable en la enseñanza de la Ingeniería, ya que tópicos como Dibujo Asistido por Computadora, Cinemática, Dibujo y diseño en ingeniería y robótica pueden ser vinculados gracias a la herramienta de integración virtual. En este proyecto se utilizó como caso de estudio la configuración de un robot paralelo tipo delta pero igualmente se puede aplicar a otro tipo de robots y mecanismos dependiendo del caso de estudio analizado en el aula.

Como una segunda etapa en el proyecto, se podría retomar más a detalle las distintas herramientas que proporciona la integración de estas dos plataformas. De igual manera se podría trabajar en la elaboración de un manual que permita a los alumnos acceder y facilitar el aprendizaje e integración de dichas plataformas en el aula.

Referencias

[1] National Instruments, “*Getting Started with NI SoftMotion for SolidWorks”*, National Instruments Corporation. U.S.A. 2010.
[2] Marlet. J. “*Parallel Robots INRIA”*, Sophia-Antipolis, France, Springer, 2006.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

[3] Norton R. *"Diseño de Maquinaria"*, Mc Graw Hill, Mexico, 4a ed., 2009.
[4] Clavel, R. "*Conception d' un robot parallélerapide á 4 degrés de liberté"*, Tesis doctoral, Ecole Polytechnique Féderale de Lausanne, Suiza, 1991.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

7. Diseño de mecanismo para seguimiento de trayectoria de tobillo en rehabilitación de marcha

Calva Yáñez Maria Bárbara[1], Calderón Romero Fernando[1], Portilla Flores Edgar Alfredo[2], Niño Suarez Paola Andrea[1], Vega Alvarado Eduardo[2].

[1]INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Azcapotzalco (ESIME-AZC), México D.F., México, pninos@ipn.mx, b_calva@hotmail.com,fercalderon02@gmail.com
[2]INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Cómputo (CIDETEC-IPN), México D.F., México
aportilla@ipn.mx, evega@ipn.mx

Resumen

En este artículo se presenta el diseño de un mecanismo para rehabilitación de tobillo en el plano sagital, el cual hace parte de un sistema para rehabilitación de marcha. El diseño se realiza utilizando un algoritmo metaheurístico, a partir del planteamiento de un problema de optimización numérica, mediante el cual se determinó la parametrización de un mecanismo de cuatro barras que debe permitir al paciente el seguimiento de la trayectoria natural del tobillo en el plano sagital de manera eficiente, con un error máximo del 1%. Se realizó un conjunto de simulaciones del algoritmo metaheurístico y la mejor solución obtenida se implementó en CAD. A partir de los resultados se pudo concluir que el mecanismo diseñado permite reproducir la trayectoria natural del tobillo en el plano sagital de manera eficiente.

Palabras clave: Diseño óptimo, mecanismo de cuatro barras, metaheurística, sistema de rehabilitación tobillo.

1. Introducción

Uno de los problemas a los que se enfrentan las personas que han sufrido accidentes cerebrovasculares (ACV) o a nivel de la espina dorsal, es la pérdida de la movilidad parcial o total de la extremidades inferiores de su cuerpo; de acuerdo a la gravedad de la lesión, el individuo tiene limitaciones funcionales en el sistema locomotor que afectan su capacidad de deambulación (marcha), la coordinación, el control motriz, entre otras. Existe entonces la necesidad de que el paciente se someta a un tratamiento de rehabilitación física, tal que la terapia a realizar pueda ayudarlo a recuperar la movilidad de sus miembros inferiores y lograr efectuar sus funciones motoras.

Las terapias de rehabilitación se basan en movimientos repetitivos continuos, que en la mayoría de los casos se llevan a cabo con la asistencia de fisioterapeutas [1], de tal forma que la efectividad de la rehabilitación se ve limitada por la capacidad física de los mismos. La rehabilitación de la marcha es un proceso que requiere especial atención, dado que la locomoción es el método de desplazamiento más utilizado por el sur humano. El proceso de marcha consiste en una sucesión de pasos con movimientos rítmicos de las extremidades y del tronco que permiten desplazar el centro de gravedad hacia adelante. Ésta sucesión de movimientos se realiza de manera repetitiva en el denominado ciclo

de marcha, que se genera en tres fases principales: 1) fase de apoyo, que representa el 60% del ciclo y en la cual el pie de referencia está tocando el suelo mediante el talón; 2) fase de balanceo, que representa un 40% del ciclo y en donde el pie de referencia no toca el suelo, mientras que el pie contralateral está oscilando; y 3) fase de doble apoyo, donde los dos pies tocan el suelo, es decir; el pie de referencia está en contacto inicial del talón mientras que el pie contralateral está en fase de despeje, representando el 10% de la fase de apoyo y el 10% de la fase de balanceo [2].

En la actualidad se han desarrollado muchos dispositivos para rehabilitación de la marcha, una relación de los más relevantes a nivel de investigación en diferentes centros alrededor del mundo se presenta en [3]. Dentro de estos desarrollos los más conocidos, por encontrarse en el mercado mundial, son los sistemas de origen suizo LOCOMAT [4] y GE-O [5]; estos sistemas fueron desarrollados con la intención de rehabilitar el proceso de marcha en víctimas de ACV, así como pacientes con lesiones en la espina dorsal y de cadera. En México algunos Centro de Rehabilitación cuentan con estos dispositivos, pero se ha visto la necesidad de pensar en desarrollar sistemas propios dadas la cantidad de casos para rehabilitación que se presentan en el país, especialmente la rehabilitación en pacientes con edades entre 2-12 años, que no son cubiertas por estos equipos. Adicionalmente, la dependencia tecnológica hacia el país de procedencia de estos equipos hace que los Centros Hospitalarios que los adquieren deban pagar altas sumas de dinero por los procesos de mantenimiento, sin olvidar el tiempo que los equipos permanecen inutilizados en espera de atención.

Por lo anterior y a partir de la metodología en V propuesta por R. Isermann en [6], en este trabajo se presenta el diseño de un mecanismo para rehabilitación de tobillo en el plano sagital, utilizando técnicas de optimización para encontrar los parámetros estructurales del mecanismo, que logran que el sistema siga una trayectoria predefinida con un error mínimo establecido como una restricción de diseño en un problema de optimización. El mecanismo debe permitir la reproducción del movimiento natural de esa articulación durante el ciclo de marcha y es la etapa base de un sistema de rehabilitación de marcha para infantes. De acuerdo a la metodología en V, es necesario primero obtener un modelo matemático del sistema físico, luego evaluar su comportamiento y proceder a un concepto de diseño inicial, a partir de este concepto se determinan opciones de diseño y se verifica cual es la más idónea de acuerdo al problema a solucionar y utilizando técnicas de optimización y simulación se obtiene un diseño óptimo, que luego es verificado mediante simulación antes de ser construido el prototipo físicamente.

En el caso de estudio presentado en este artículo, en la sección 2 se obtiene inicialmente la cinemática directa del miembro inferior, se obtiene luego la trayectoria que sigue el tobillo a partir del desplazamiento angular de las articulaciones de rodilla y cadera en el plano sagital y de los parámetros estructurales de la extremidad inferior, y con base en esta trayectoria se elige un mecanismo capaz de reproducirla. Para el diseño del sistema se propuso el uso de un mecanismo de cuatro barras, debido a que su topología permite la generación de trayectorias que corresponden al movimiento de interés para la rehabilitación del tobillo, [7] En la sección 3 se presenta la síntesis dimensional del mecanismo, que se realiza a partir de una metodología basada en el diseño óptimo. El problema de diseño se plantea como un problema de optimización numérica y se resuelve mediante el uso de técnicas heurísticas; los resultados obtenidos determinan las dimensiones del mecanismo seleccionado. La sección 4 corresponde al diseño en CAD del mecanismo, la evaluación de su operación y la discusión de los resultados. Finalmente, las conclusiones y el trabajo a futuro se incluyen en la Sección 5

2. Cinemática del miembro inferior

En biomecánica, la cinemática describe los movimientos de los segmentos corporales sin considerar las fuerzas que los generan [8]. Para estudiar el movimiento de los segmentos durante la marcha, el valor de referencia se considera a partir de los planos anatómicos, en el cuerpo humano se consideran tres. El plano transversal que es perpendicular al eje vertical que va de la cabeza a los pies y divide al cuerpo en inferior y superior. El plano sagital divide al cuerpo en dos mitades simétricas: derecha e izquierda. El plano coronal o frontal divide al cuerpo en anterior y posterior.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

En la figura 1 se modela de manera esquemática el miembro inferior como una cadena cinemática abierta; considerando el conjunto como un péndulo doble invertido, siendo el tobillo el extremo libre que se mueve en el plano sagital.

A partir de esta suposición, la cinemática directa de la pierna se obtiene como:

$$X = l_1 \cos\left(q_1\right) + l_2 \cos(q_1 + q_2) \quad (1)$$

$$Y = l_1 \sin(q_1) + l_1 \sin(q_1 + q_2) \quad (2)$$

Dónde

l_1 y l_2 son los distancias cadera-rodilla y rodilla-tobillo, respectivamente.
q_1 y q_2 son los ángulos de rotación respecto al eje Z, de la cadera y la rodilla respectivamente.

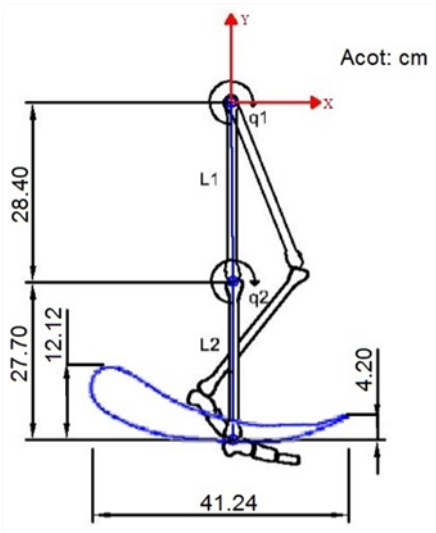


Figura 1. Diagrama esquemático del miembro inferior.

Con el fin de generar una trayectoria como la que realiza el tobillo durante la locomoción humana proyectada en el plano sagital, tomando como datos de base los ángulos formados por las articulaciones de cadera y rodilla durante un ciclo de marcha estandar reportados en [9], y utilizando la herramienta interpolación *shape - preserving Interpolat,* que está incluida en el software Matlab R2013b®, se generaron los polinomios con los cuales es posible calcular los ángulos de movimiento de la articulación de la cadera (q_1) y de la rodilla (q_2) al realizar una marcha normal. Los polinomios están parametrizados a partir del porcentaje del ciclo de marcha, x, lo que permite encontrar el valor de los ángulos (q_1) y (q_2) en cualquier etapa del ciclo de marcha, como se observa en las ecuaciones (3) y (4),

$$\begin{aligned} q_1 = {} & 2.2667\text{e-}12 * x^7 - 1.9823\text{e-}09 * x^6 + 6.649\text{e-}07 * x^5 \\ & - 0.00010766 * x^4 + 0.0085951 * x^3 - 0.29899 * x^2 \\ & + 2.7138 * x + 27.113 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} q_2 = {} & 8.3621\text{e-}12 * x^7 - 5.7855\text{e-}09 * x^6 + 1.5442\text{e-}06 * x^5 \\ & - 0.00019883 * x^4 + 0.012581 * x^3 - 0.3539 * x^2 \\ & + 3.5788 * x + 6.0304 \end{aligned} \quad (4)$$

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

La trayectoria de desplazamiento del tobillo en el plano sagital se genera entonces a partir de un conjunto de 12 puntos de precisión dobles, calculados utilizando la cinemática directa dada en las ecuaciones (1) y (2), utilizando los ángulos (q_1) y (q_2) que se generan a partir de las ecuaciones (3) y (4) en las diferentes etapas del ciclo de marcha. Los puntos generados se presentan en la tabla 1, y la trayectoria del tobillo obtenida se observa en la figura 2, es relevante observar que dicha trayectoria tiene forma de gota. Esta forma es una característica importante para seleccionar el tipo de mecanismo que se puede utilizar para el diseño del sistema de rehabilitación de tobillo.

A partir del análisis de la trayectoria que debe seguir el sistema de rehabilitación de tobillo, se propuso utilizar un mecanismo de cuatro barras, debido a que su topología permite la generación de trayectorias de tipo gota [7]. En la siguiente sección se presenta como fueron calculadas las dimensiones óptimas para este mecanismo.

Tabla 1. Desplazamiento del tobillo en el plano sagital.

Trayectoria Tobillo		
Puntos	**X(cm)**	**Y(cm)**
1	0	-56.1
2	-9.742	-55.248
3	-18.782	-51.957
4	-22.062	-47.879
5	-20.215	-44.18
6	-10.455	-48.652
7	0.239	-52.717
8	6.774	-53.634
9	12.002	-53.439
10	14.417	-53.334
11	19.01	-51.874
12	14.52	-54.188

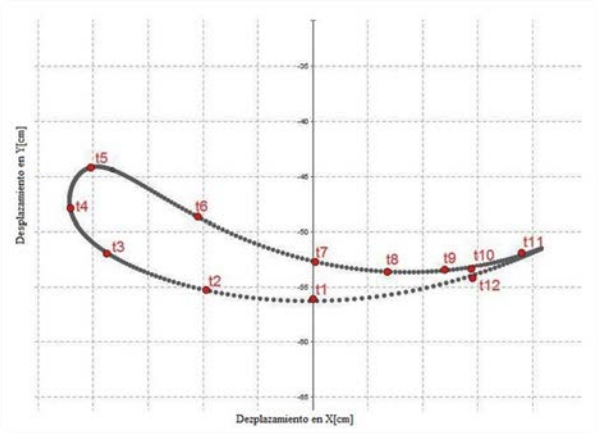


Figura 2. Trayectoria del pie en el plano sagital.

3. Caso de estudio: diseño óptimo de un sistema para rehabilitación del tobillo en el plano sagital

El caso de estudio de este trabajo, se basa entonces en el diseño óptimo de un mecanismo de cuatro barras como elemento principal del sistema de rehabilitación de tobillo en el plano sagital. El diagrama esquemático de dicho mecanismo se muestra en la figura 3, donde se observa que r_1 es el eslabón de referencia, r_2 es el eslabón de entrada, r_3 es el acoplador y r_4 es el eslabón de salida, θ_i corresponde al desplazamiento angular de los eslabones para *i=1,2,3,4* . El mecanismo tiene acoplado un actuador en el eje del eslabón de entrada (r_2). El punto C del acoplador (r_3), que se observa en la figura 3, debe pasar ordenadamente por una secuencia de N puntos, los cuales son la trayectoria que el mecanismo debe seguir.

El análisis cinemático detallado del mecanismo de cuatro barras se puede consultar en [10]. Para la descripción del mecanismo de cuatro barras de la figura 3, en el sistema global de coordenadas *OXY* el i.esimo punto de precisión se indica cómo,

$$C_d^i = [C_{xd}^i, C_{yd}^i]$$

Y el conjunto de N puntos de precisión se define cómo,

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

$$\Omega = \left\{ C_d^i \,\middle|\, i \in N \right\}$$

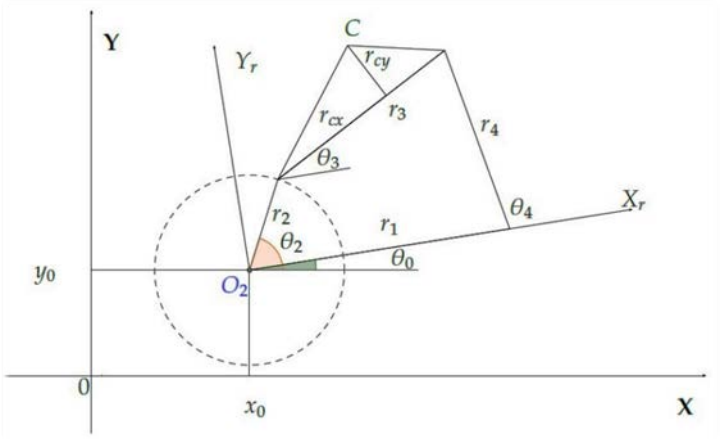


Figura 3. Diagrama esquemático de un mecanismo de cuatro barras.

En este caso de diseño, el problema planteado es determinar el valor de la longitud de los eslabones (r_1, r_2, r_3, r_4, r_{cx}, r_{cy}) del mecanismo, el ángulo offset θ_0, la distancia $\vec{R}_0$ y los ángulos del eslabón de entrada que hacen posible alcanzar los N puntos de precisión definidos. Entonces, dado un conjunto de valores de eslabones y R_0, $\vec{\theta}_0$, se puede escribir cada punto del acoplador como:

$$C^i = [C_x(\theta_2^i), C_y(\theta_2^i)]^T \tag{5}$$

La posición del acoplador en el sistema de referencia, OX_rY_r está dada por,

$$\begin{aligned} C_{xr} &= r_2 \cos\theta_2 + r_{cx} \cos\theta_3 - r_{cy} \sin\theta_3 \\ C_{yr} &= r_2 \sin\theta_2 + r_{cx} \sin\theta_3 - r_{cy} \cos\theta_3 \end{aligned} \tag{6}$$

Desde el sistema global de coordenadas OXY se tiene que,

$$\begin{aligned} C_x &= \cos\theta_0 C_{xr} - \sin\theta_0 C_{yr} + X_0 \\ C_y &= \sin\theta_0 C_{xr} - \cos\theta_0 C_{yr} + X_0 \end{aligned} \tag{7}$$

El diseño óptimo del mecanismo de la figura 3 se realiza con el propósito de obtener un error mínimo en el seguimiento de la trayectoria mostrada en la figura 2, para ello se tomó el conjunto de parámetros que determinan la dimensión del mecanismo de cuatro barras, así como el desempeño funcional en el seguimiento de trayectoria como elementos del problema de optimización. Una explicación detallada de la función de desempeño del sistema, las restricciones de diseño y las cotas de diseño o restricciones geométricas se puede consultar en [11].

Para el seguimiento de trayectoria que el mecanismo debe realizar como parte del problema de optimización, se generaron 12 puntos de precisión a partir de los mostrados en la tabla 1, a dichos puntos se les adicionó un error de 1 centímetro en el límite superior e inferior, esto para asegurar que el punto C del acoplador siga la trayectoria natural del tobillo en el plano sagital, teniendo como error máximo los limites propuestos en el problema de optimización.

Así, el diseño óptimo del mecanismo de cuatro barras se llevó a cabo proponiendo dicho diseño como un problema de optimización numérica, el cual es resuelto mediante el algoritmo de Evolución

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Diferencial (ED) [12]. Para obtener la síntesis dimensional del mecanismo se realizaron 30 simulaciones independientes, con los siguientes valores para los parámetros del algoritmo ED: una población de 100 individuos, con factor de cruza aleatorio entres [0.8 1], y factor de mutación aleatorio entre [0.3 0.9] con un total de 2000 generaciones. El algoritmo se codificó en Matlab® 2013b®, ejecutado en una computadora portátil con 6 GB RAM Intel® procesador Core i5 a 2.5 GHz, y Microsoft Windows® 7 OS.

De las simulaciones realizadas se tomó la mejor solución obtenida para su implementación en CAD; los resultados de esta síntesis dimensional óptima del mecanismo se muestran en la Tabla. 3. En la figura 4 se presenta el diseño en CAD del mecanismo de cuatro barras correspondiente a la mejor solución obtenida mediante el algoritmo de E.D, se observa que el mecanismo cumple con el problema de optimización y por lo tanto reproduce la trayectoria natural del tobillo en el plano sagital con un error menor al 1% al realizar el seguimiento de trayectoria.

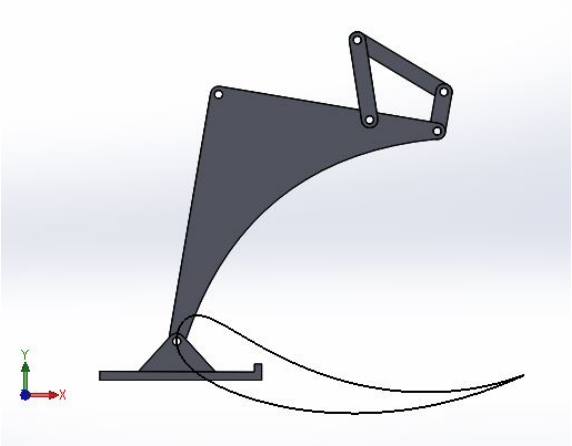


Figura 4. Modelo en CAD del mecanismo de cuatro barras.

4. Análisis de resultados

En la figura 5 se observa la trayectoria generada por el mecanismo de cuatro barras correspondiente a la mejor solución obtenida de la síntesis dimensional; se puede observar que la trayectoria generada por el mecanismo pasa entre los puntos de precisión generados para el seguimiento de la trayectoria, y por el centro de los limites colocados, los cuales se muestran como marcadores circulares, para logar un mínimo error de seguimiento sin necesidad de establecer un algoritmo de control de seguimiento de trayectoria para el actuador que se coloca en el mecanismo. De esta manera se puede verificar que el error que se produce durante el seguimiento de la trayectoria es menor al 1% y por lo tanto, el mecanismo diseñado mediante la metodología aquí propuesta es una opción viable para el diseño del sistema de rehabilitación de tobillo.

Tabla 3. Mejor solución obtenida con ED.

Elemento	Valor [cm]
r_1	9.863208629
r_2	4.949455445
r_3	7.59958287
r_4	7.59958287
r_{cx}	25.8485343
r_{cy}	31.8510601
Θ_0	2.71531261

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

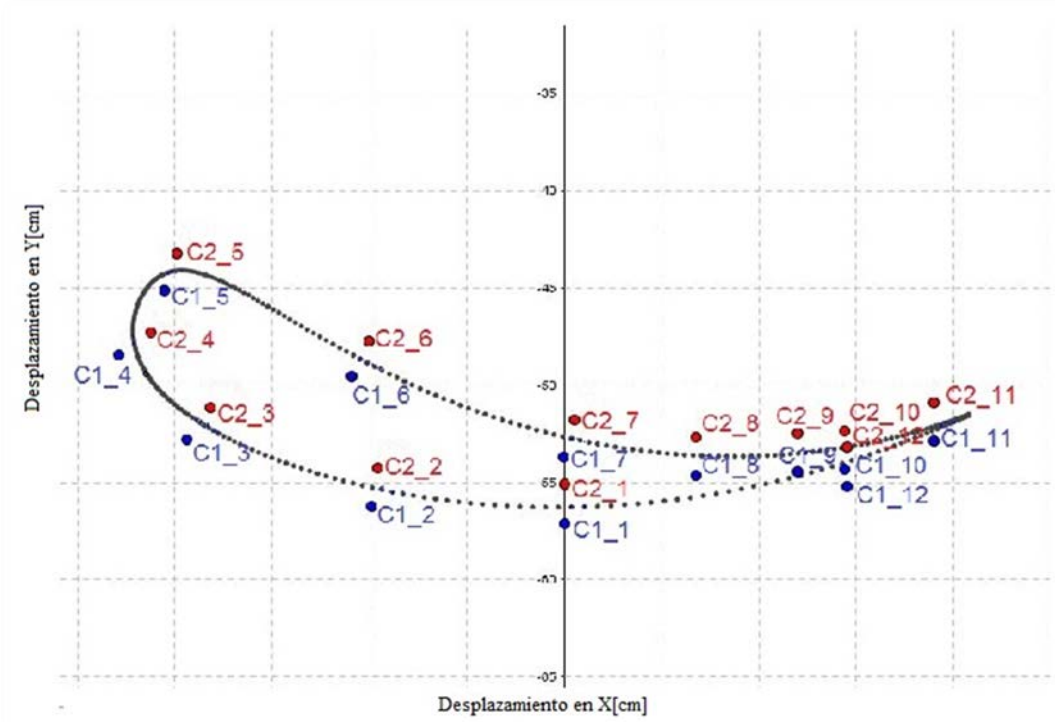


Figura 5. Trayectoria generada por el mecanismo de cuatro barras.

5. Conclusiones

Con el fin de imitar el movimiento natural del tobillo en el plano sagital, en este artículo se presenta el diseño óptimo de un mecanismo de cuatro barras, el cual tenía como objetivo un mínimo error de seguimiento (1%), de una trayectoria generada a partir de la interpolación de las trayectorias de los ángulos de cadera y rodilla en el mismo plano. Considerando que las dimensiones del miembro inferior afectan la forma de la trayectoria del tobillo, el mecanismo puede ser adaptado a diferentes longitudes de este, cumpliendo la misma función. De las características del diseño, la síntesis óptima del mecanismo permite su reconfiguración, proporcionando una gran flexibilidad al sistema, que es una de los principales principios de la metodología en V.

Por último, el diseño del mecanismo en CAD permite, sin la necesidad de construirlo, verificar si su funcionamiento es el deseado y definir cuál es la mejor opción de diseño, para iniciar así el diseño en detalle del sistema.

El trabajo a futuro es la consideración de otros mecanismos para el seguimiento de las trayectorias naturales de rodilla, hombro y cadera en los planos sagital y transversal respectivamente, como parte del diseño de un mecanismo integral para la rehabilitación de marcha.

Referencias

[1] Benedetti M., Catani F., Leardini A., Pignotti E., Giannini S.,"Data Magnagement in gait analysis for clinical application", Clinical Biomechanics. Elsevier, Vol 3, No 3, pp 204-215, 1998.

[2] Margareta N., Frankel H. V., “Bases Biomecanicas del Sistema Musculoesqueletico”, McGraw Hill, Estados Unidos, 3ª. Ed., 1995.
[3] M.T. Figueroa Amador, P.A. Niño Suarez, E.A. Portilla Flores, and A. Medina Salas. “A Robotic System to Gait Training for Children with Cerebral Palsy” IFMBE Proceedings VI Latin American Congress on Biomedical Engineering CLAIB 2014, Paraná, Argentina 29, 30 & 31 October 2014, Volume 49 of the series, pp 309-312. Ed. Springer.
[4] Jezernik S., Colombo G., and Morari M., “Automatic gait-pattern adaptation algorithms for rehabilitation with a 4- DOF ro-botic orthosis,” IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol 20, No 3, pp. 574–582, 2004.
[5] Hesse S., Waldner A., Tomelleri C. “Research Inno-vative gait robot for the repetitive practice of floor walking and stair climbing up and down in stroke patients”, Journal NeuroEngineer-ing and Rehabilitation, vol 7, No 30, pp 1-10, 2010.
[6] Rolf Isermann, “Mechatronic systems innovative products with embedded control”, Control ingineering Practice, Elsevier, Vol.16, pp 14-29, 2008.
[7] Norton R. L., “Diseño de Maquinaria una Introducción a la síntesis de Mecanismos y Maquinas” McGraw Hill, México, 1995.
[8] Willems P.A., Schepens B., Detembleur C. “Marcha Normal”, EMC Kinesiterapia, Medicina Física, vol 33, No 2, pp 1-29, 2012.
[9] Whittle W. M.,”Clinical gait analysis: A review”, Human Movement Science, Elsevier, Vol 15, pp 369-387,1996.
[10] Calva Y. M. B., Niño S. P. A., Villarreal C. M. G., Sepúlveda C. G., Portilla F. E. A., “Differential Evolution for the Control Gain’s Optimal Tuning of a Four-bar Mechanism”, POLIBITS, Vol 47, pp 67-73, 2013.
[11] Vega A. E., Santiago V. E., Portilla F. E. A., Calva Y. M. B., “Diseño Óptimo de un Mecanismo de Cuatro Barras Utilizando Inteligencia de Cúmulo”, XVI Congreso Latinoamericano de Control Automático, IFAC Asociación Mexicana de Control, pp 432-437, Quintana Roo México, 2014
[12] Price, K., Storn, R., Lampinen, J., “Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization”, Natural Computing Series, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

8. Desarrollo e implementación de Instrumentos Virtuales para un equipo de pruebas biaxiales

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

noe_hdz_c@hotmail.com

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.

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo de dos instrumentos virtuales VI para controlar un equipo de pruebas de cargas biaxiales. El equipo consiste de cuatro actuadores neumáticos que permiten aplicar una carga biaxial a una probeta cruciforme del material a examinar.

La aplicación de la carga se realiza mediante actuadores neumáticos manipulados por medio de electroválvulas 5/2. Este arreglo permite controlar la activación automática de cada uno de los actuadores, así como medir la carga aplicada por cada uno, a la probeta cruciforme. Para esto, se desarrollaron 2 instrumentos virtuales: un VI para activación de los actuadores neumáticos y una VI para medir la carga aplicada. El VI de activación de los actuadores neumáticos está basado en una tarjeta de adquisición National Instruments (NI 6009) donde se utilizan las salidas digitales para activar los actuadores por medio de las electroválvulas. Para el VI de medición de carga aplicada se adaptaron transductores de carga en cada actuador y se utilizaron los módulos NI 9219 y NI cDAQ-9174. Los transductores se calibraron mediante una prueba de tensión.

Palabras clave: biaxial, transductor, carga, instrumento virtual, adquisición de datos.

1. Introducción

Una prueba de tensión consiste en un ensayo donde se somete un material a esfuerzos de tracción con el objetivo de determinar sus propiedades mecánicas (resistencia a la ruptura, límite elástico, límite de cedencia y carga de fractura).

En la figura 1 se muestra el equipo a instrumentar. Este equipo consiste de cuatro actuadores colocados a 90º cada uno sobre una base rígida [1]. Esto permite aplicar cargas biaxiales a una probeta cruciforme colocada en el centro del arreglo, para obtener la deformación en el centro de la probeta. Lo anterior se obtiene aplicando la metodología siguiente:

- Instrumentar los transductores de carga.
- Acoplar los transductores de carga al equipo.
- Realizar interfaz de acondicionamiento y potencia de señal.
- Adquisición de mediciones en los actuadores aplicando una presión.

El equipo disponible actualmente, se requiere mejorar para garantizar que las cargas en ambos ejes de carga de la probeta sean iguales. Por esto se está instrumentando el equipo disponible,

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

mediante galgas extensométricas, celdas de carga y equipo de acondicionamiento de las señales. El diseño de este equipo estuvo basado en equipos análogos, como los desarrollados por J.P. Boehler, S. Koss y U. Lindholm [2,3], que también utilizan servomotores y actuadores hidráulicos.

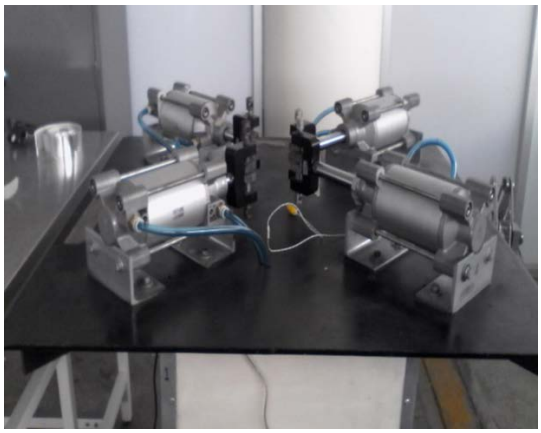


Figura 1. Equipo disponible.

2. Instrumentación

Con base en el equipo disponible se rediseñó el acoplamiento colocando celdas de carga a los cuatro actuadores. La instrumentación para el VI de medición de carga, se desarrolló utilizando el software LabVIEW®. Empleando los módulos cDAQ-9174 y NI 9219 se desarrolló un programa que permite adquirir la carga aplicada en tiempo real, simultáneamente en ambos direcciones.

El software de instrumentación virtual VI ha facilitado la instrumentación de los procesos industriales ya que permite monitorear y manipular los sistemas de control de las variables involucradas y proporciona la interfaz de usuario-computadora.

La interfaz final nos permite monitorear, por medio del software LabVIEW® y tarjetas de adquisición de datos, la fuerza aplicada mediante el ajuste de cada actuador del equipo. La importancia de conocer la fuerza aplicada por los actuadores es fundamental para trabajos futuros donde se desea conocer las deformaciones en el centro de la probeta cruciforme con respecto a las cargas aplicadas.

En la figura 2 se muestra la programación a bloques que se implementa para la correcta adquisición de datos. Se muestran los elementos que la componen y la lógica utilizada. Esta última se diseñó para que primero lea 25,000 muestras a 50KHz. Posteriormente se obtiene el promedio de todas las muestras y se incluye un botón de calibración.

3. Manipulación de actuadores neumáticos

Los actuadores que se utilizaron son de doble efecto (5/2), accionados mediante electroválvulas de 12 Volts. De estos elementos se llevó a cabo el análisis de funcionalidad mediante una emulación por medio del software Fluid Sim (figura 3). Esto nos permitió conocer la posición en la cual se deben colocar los actuadores considerando la geometría de la probeta a analizar [4].

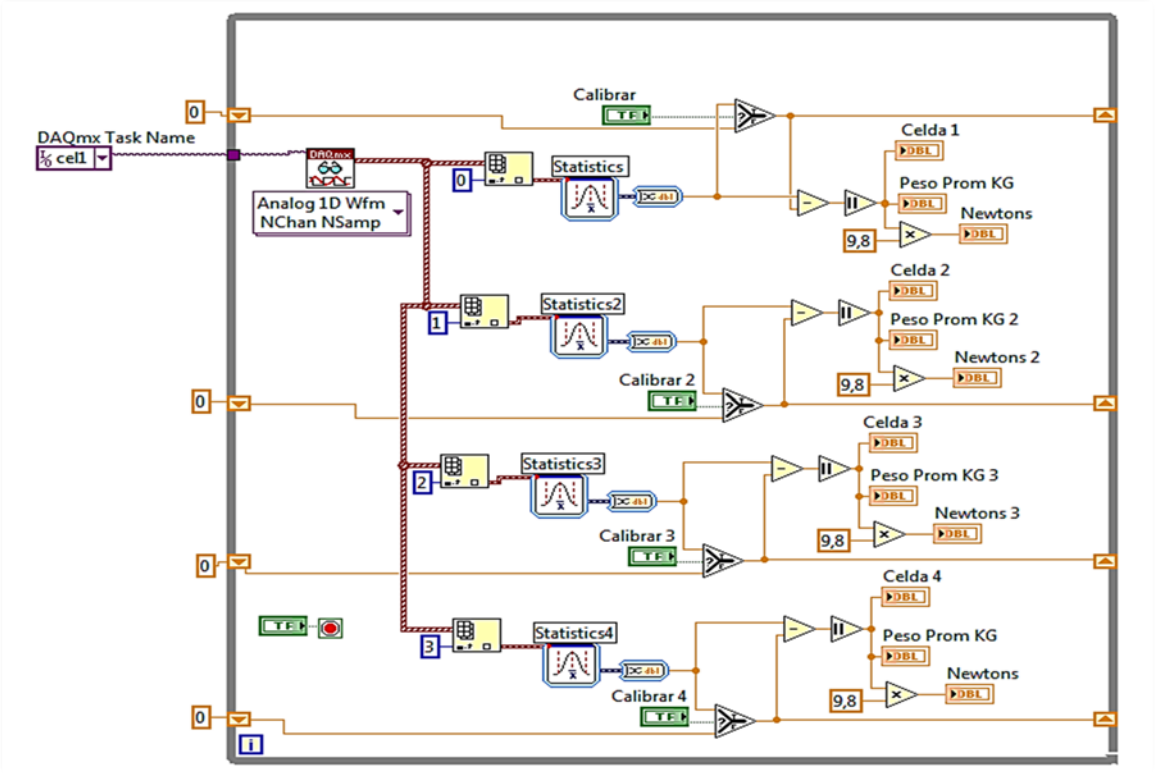


Figura 2. Programación a bloques.

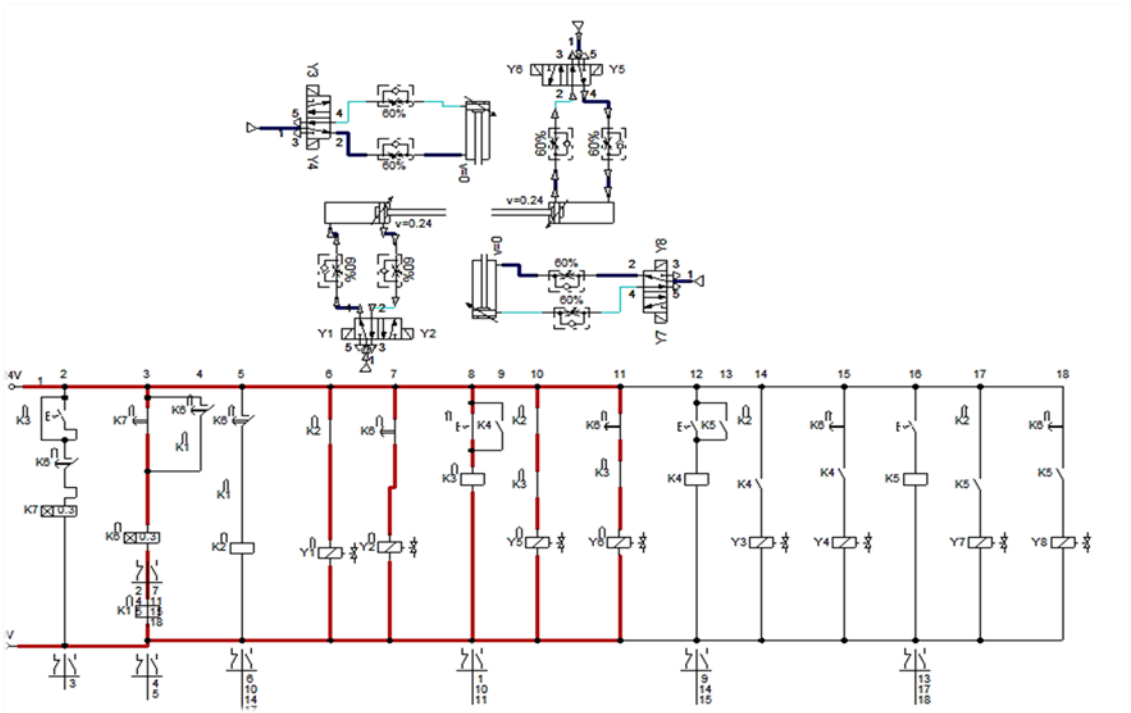


Figura 3. Simulación de actuadores neumáticos.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

El medio de accionamiento de los actuadores es controlado mediante la tarjeta de adquisición NI USB-6009, con sus salidas digitales. Esto hizo necesario el diseño e implementación de una etapa de acondicionamiento de señales. Los componentes electrónicos que se utilizaron incluyen transistores TIP122, resistencias y leds emisores de luz. El circuito electrónico diseñado, se simuló, antes de implementarlo físicamente mediante el software ISIS Proteus como se muestra en la figura 4, con el fin de conocer su comportamiento electrónico. El diseño de la PCB se muestra en la figura 5.

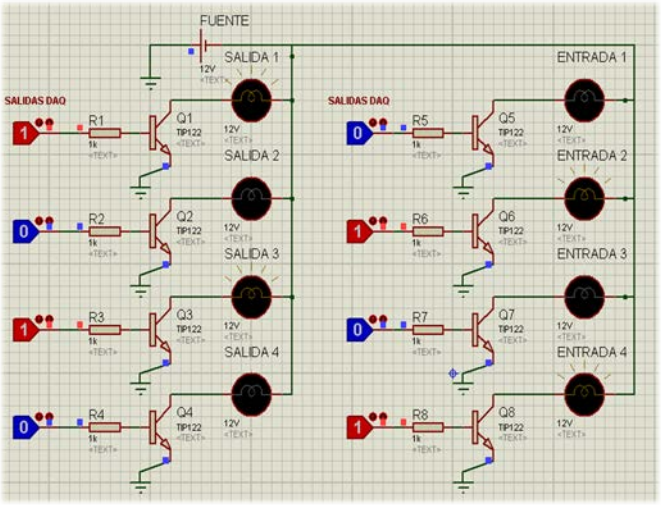


Figura 4. Circuito de acondicionamiento y potencia.

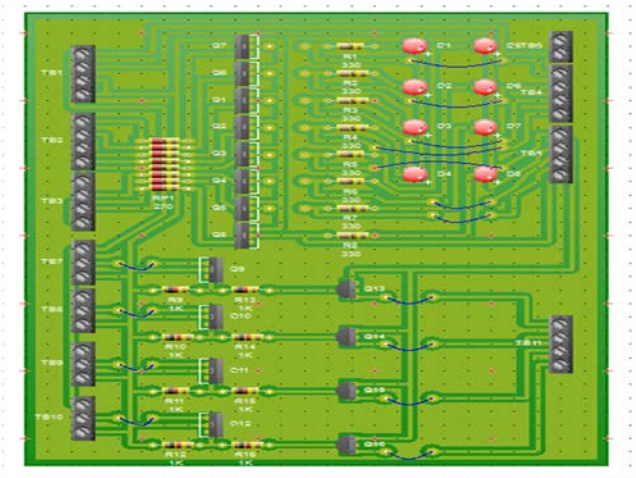


Figura 5. Diseño en PCB.

El VI para manipulación de los actuadores y adquisición de datos se desarrolló empleando LabVIEW® y el modulo NI USB-6009. Se utilizaron ocho salidas digitales acopladas a la etapa de acondicionamiento de la señal. La programación realizada a bloques, contiene un conversor analógico-digital de ocho bits para activar o desactivar los actuadores que previamente se direccionaron a una entrada digital de la tarjeta de adquisición.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

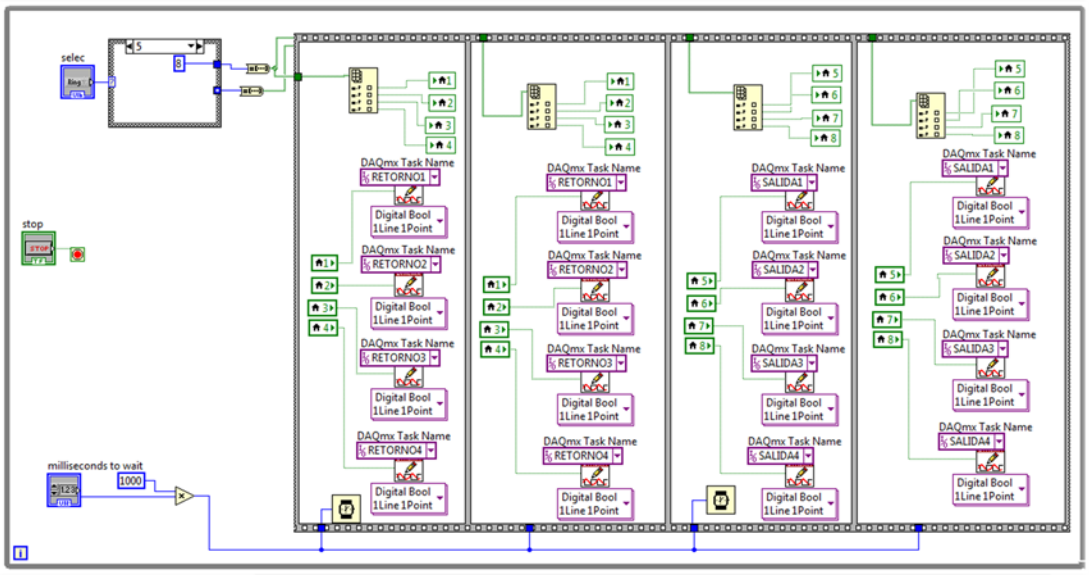


Figura 6. Programación a bloques para activación/desactivación de actuadores.

4. Análisis de resultados

Para obtener los resultados, se requirió un VI con objeto de manipular los actuadores a una determinada frecuencia, manipularlos por partes y conocer el número de ciclos que realizan. Implementar lo anterior nos dio como resultado la interfaz de usuario que permite monitorear y manipular el equipo. En la figura 7 se muestran las pantallas de resultados de las señales de los transductores de carga. En la figura 8 se aprecia el estado de los controles e indicadores del estado de operación del equipo. La pantalla desplegada permite visualizar y grabar en tiempo real, el nivel de carga en cada uno de los extremos de la probeta cruciforme. El equipo permite visualizar la carga en dos unidades, en este caso Newtons o Kilogramos y observar la gráfica de valores de carga con respecto del tiempo. También se dispone de un botón de calibración que ajusta a cero las lecturas antes de iniciar la adquisición, así como un botón de paro.

Figura 7. VI desarrollado para carga de actuadores en funcionamiento.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Figura 8. VI desarrollado para manipulación de actuadores en funcionamiento.

5. Conclusiones

Las VI desarrolladas, nos permiten realizar análisis de carga con respecto a una presión aplicada a los actuadores neumáticos. A su vez, con esta presión se puede controlar la carga aplicada a la probeta cruciforme bajo prueba.

El software desarrollado para la instrumentación virtual nos permitió contar con interfaces para cada variable de interés. En este caso se resalta la importancia de seleccionar adecuadamente los módulos de adquisición para las tareas a realizar ya que esto facilita el acondicionamiento de la señal a procesar.

Referencias

[1] Gutiérrez J., Lozano A., Manzano A. "*Propuesta de probeta y equipo para prueba biaxial para la predicción de fatiga en materiales compuestos",* México 2010. (Sujeto a revisión).

[2] Boehler J., Demmerle S. and Koss S. *"A New Direct Biaxial Testing Machine for Anisotropic Materials"*, Grenoble, France 1993.

[3] Lindholm U. and Yeakley L. "*A Dynamic Biaxial Testing Machines*"; SESA Spring Meeting held in Detroit, Mich., 1996.

[4] Smits A., Van Hemelrijck D., Philippidis T., Cardon A. "*Design of a cruciform specimen for biaxial testing of fibre reinforced composite laminates*", Composites science and technology, Belgium 2006.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

9. Diseño conceptual de mecanismos a implementar en un simulador mecánico para probar prótesis articulares de rodilla

Escobar Medina J.A.[1], Aguirre Nájera A.E.[1], Barceinas Sánchez J.D.O.[1], Álvarez Vera M.[2], García García A.L.[1]

jescobarm1500@alumno.ipn.mx, obarceinas@ipn.mx

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

[2]Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S.A. de C.V., Ciencia y Tecnología N° 790, Col. Saltillo 400, C.P. 25290 Saltillo, Coahuila. México.

Resumen

La metodología del diseño en la ingeniería mecánico es de gran utilidad, pues permite tener un enfoque claro sobre qué se tiene que hacer desde el inicio de un desarrollo, con base en una necesidad a satisfacer, hasta la realización del producto, habiendo analizado varias opciones de solución y eligiendo la mejor, pudiéndose enfocar en la vida útil o rentabilidad que se quiera lograr.

Utilizando esta metodología y tomando los requerimientos establecidos en la norma ISO 14243-3:2004, respecto a los parámetros de desplazamiento para máquinas de pruebas de desgaste de prótesis articulares de rodilla, se definieron los datos de entrada para seleccionar equipos y realizar el diseño conceptual de los elementos de los mecanismos que realizarán el movimiento antero-posterior y rotación tibial. Dichos mecanismos se implementarán en un simulador mecánico que se desarrolla en el CICATA-IPN Unidad Querétaro. Actualmente esta máquina tiene incorporados los mecanismos para aplicar la carga variable y realizar el movimiento de flexión-extensión de la componente femoral.

El software utilizado para realizar el diseño conceptual de componentes y mecanismos fue Solidworks™. Antes de fabricar los componentes de los mecanismos propuestos, éstos se generaron y ensamblaron de manera virtual para simular su funcionamiento. Se observó que los mecanismos propuestos cumplen con los requerimientos definidos, por lo que podrán construirse y ensamblarse al simulador sin ningún problema, quedando sus rangos de desplazamiento dentro de los parámetros establecidos por la norma ISO mencionada.

Palabras clave: Diseño mecánico, cinemática de rodilla, rotación tibial, antero-posterior, CAD

1. Introducción

Padecimientos como la osteoartrosis [1] y artritis reumatoide [2], en grados severos, pueden deteriorar la superficie articular de la rodilla. La razón más frecuente para implantar una prótesis articular de rodilla es restaurar el movimiento y eliminar el dolor. En una artroplastia total de rodilla se inserta un componente femoral, generalmente metálico, en el extremo inferior del fémur, y en el extremo superior de la tibia se inserta el componente tibial formado por una platina metálica que soporta el inserto tibial hecho de polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) [3].

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Antes de implantar un nuevo modelo de prótesis articular de rodilla debe realizarse una exhaustiva investigación preclínica que requiere la realización de pruebas *in vitro* [4], [5], para lo que deben usarse simuladores mecánicos que reproduzcan la cinemática y dinámica de dicha prótesis *in vivo*. A fin de estandarizar la realización de dichas pruebas, los simuladores a utilizar deben cumplir los requerimientos establecidos en la normas ISO 14243-1:2002 [6] y 14243-3:2004 [7].

Debido a la complejidad de la cinemática de una prótesis articular de rodilla y a la variación de la carga aplicada, se utilizan simuladores mecánicos con el propósito de evaluar diseños y/o materiales de los componentes de este tipo de implantes [8], [9], [10]. Aunque también es posible utilizar aparatos con configuraciones más simples para evaluar alguna característica específica de los materiales [11], [12], [13].

Una de las áreas fundamentales de la ingeniería mecánica es el diseño de componentes o mecanismos que satisfagan necesidades específicas [14], p. ej., transmisión de una fuerza y/o articulación de movimientos. Los sistemas mecánicos o mecanismos están conformados por elementos, que mediante un diseño adecuado son compatibles entre sí para su ensamble, ya que los problemas potenciales se prevén y solucionan previo a su manufactura.

Los ingenieros mecánicos aplican diversas habilidades y conocimientos en sus tareas de diseño [14], por ejemplo:

- Realizar dibujos técnicos y diseño asistido por computadora.
- Conocer propiedades de los materiales.
- Dominar fundamentos de estática, dinámica, resistencia de materiales, cinemática y mecanismos.

Actualmente, en el Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional Unidad Querétaro (CICATA-Qro), se desarrolla un simulador mecánico para realizar pruebas *in vitro* de prótesis articulares de rodilla, en el que fundamentalmente se estudiará el efecto de la modificación de la superficie de contacto de insertos tibiales de UHMWPE [15] sobre el comportamiento de la lubricación.

Este trabajo muestra la aplicación de la metodología del diseño a la realización del diseño conceptual de los mecanismos que producirán el movimiento antero-posterior y rotación tibial, los cuales se implementarán al simulador mecánico que se desarrolla en CICATA-Qro, Figura 1.

Figura 1. Simulador para probar prótesis articulares de rodilla.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

2. Metodología

Para realizar el diseño conceptual de los mecanismos que producirán el movimiento antero-posterior y rotación tibial, es necesario diseñar sus elementos individuales, que al ensamblarse con otros se constituya un subsistema, y que al integrarse con otros ya existentes, se concluya el simulador en desarrollo, satisfaciendo los requerimientos de las normas ISO mencionadas.

Para empezar es necesario identificar las necesidades y/o requerimientos a satisfacer. Éstas pueden formularse mediante definiciones claras y concisas de las funciones, requisitos del diseño y criterios de evaluación [14].

En la Figura 2 se muestra el proceso de ingeniería de diseño propuesto, aplicable como una metodología de diseño [16]. El primer paso es la definición del problema que usualmente consiste en listar los requisitos del producto o necesidades del cliente, así como las especificaciones acerca de las funciones actuales y modificaciones futuras que pudieran realizarse. En el paso siguiente se obtiene información relevante acerca del diseño del producto, así como de su funcionalidad; puede hacerse una investigación sobre productos similares existentes en el mercado. Una vez que los detalles están claramente identificados, el diseñador genera varios diseños conceptuales, con ayuda de software CAD, para solucionar el problema que se planteó; pueden crearse prototipos virtuales de estos conceptos. En este paso se tienen que considerar criterios de costo, seguridad, ergonomía, entre otros. Teniendo esto en cuenta, se selecciona el concepto más prometedor para su posterior análisis. El diseño de detalle y la etapa de análisis permiten evaluar completamente el o los conceptos mejor calificados, dando lugar a la selección del diseño conceptual final, que se espera se adapte mejor y cumpla los requisitos del producto a fabricar. Posteriormente, el prototipo del diseño se prueba para verificar que cumpla con lo que se estableció, si no es así, se realizan las modificaciones necesarias para que cumpla.

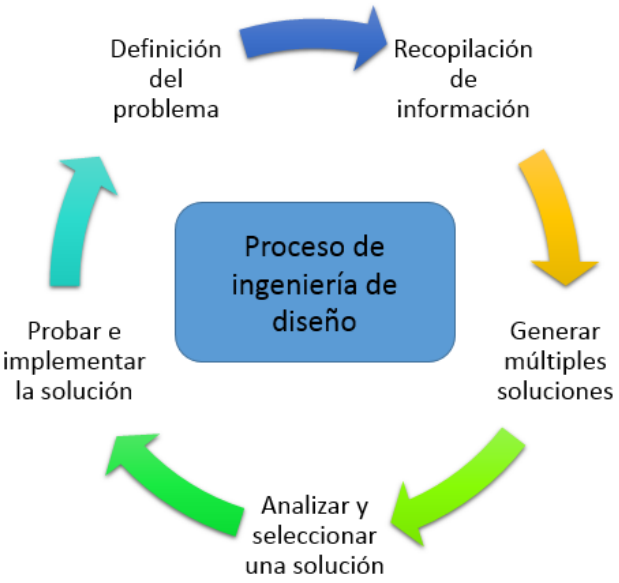


Figura 2. Proceso de ingeniería de diseño.

3. Desarrollo

El proceso de diseño inicia con la identificación de los requerimientos que deben cumplir los mecanismos que producirán el movimiento antero-posterior y rotación tibial, establecidos en la norma ISO 14243-3 [7], para el ciclo de la marcha. En las Figuras 3 y 4 se muestran las curvas que delimitan

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

la tolerancia de ±5%, permitida para el movimiento antero-posterior y rotación tibial, respectivamente. Se permite un desfase de ±3% en el porcentaje del ciclo.

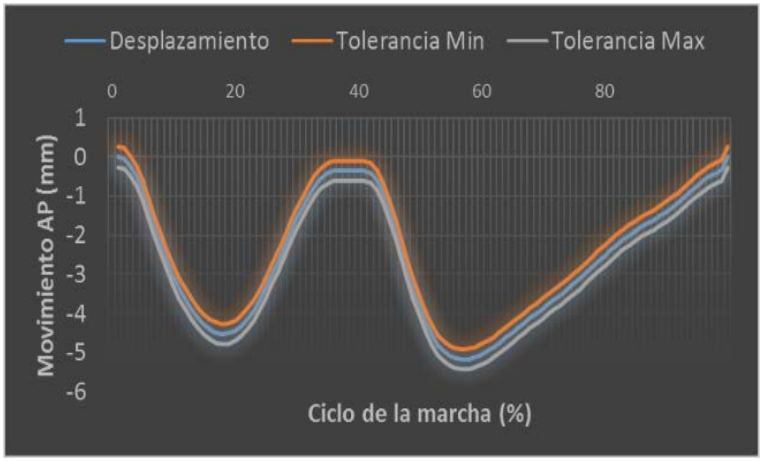


Figura 3. Tolerancia del movimiento antero-posterior en función del porcentaje del ciclo de la marcha.

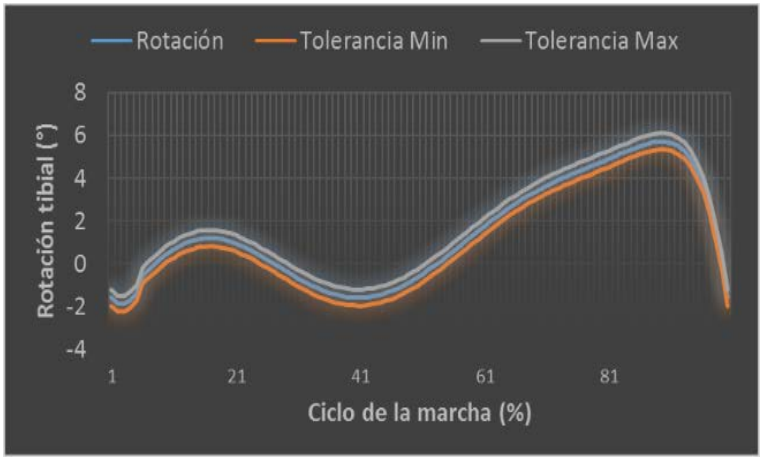


Figura 4. Tolerancia de la rotación tibial en función del porcentaje del ciclo de la marcha.

El segundo paso es la definición del problema. Ésta debe ser concreta e incluir todas las especificaciones de los elementos que se diseñan. Puede decirse que estas son las entradas y salidas que el sistema tendrá, las características y dimensiones del espacio que los mecanismos ocuparán, además de sus limitaciones. Las entradas para el diseño son:

- Los mecanismos tienen que acoplarse a algo que ya está construido.
- Los movimientos antes descritos tienen que reproducirse dentro de las tolerancias indicadas.
- El movimiento de los mecanismos se realizará mediante servomotores y elementos mecánicos comerciales.

Los factores principales que se toman en cuenta para diseñar los mecanismos antes mencionados, se enuncian a continuación:

- Ensamble
- Ubicación
- Dimensiones

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

- Peso
- Modificaciones al sistema actual

El tercer paso es la síntesis, que también puede llamarse invención del diseño conceptual. Varias alternativas de solución, tantas como sea posible, deben proponerse, analizarse y cuantificarse, en términos de los requisitos establecidos. Conforme el desarrollo de un concepto progresa, debe realizarse un análisis para evaluar si el desempeño de éste es cuando menos satisfactorio, y si lo es, qué tan bien se desempeñaría. Esto permite mejorar los conceptos más favorables. De esta manera es posible optimizar varios componentes de un sistema. Regresar a la síntesis permite ver qué efectos tendría el elemento diseñado sobre las partes restantes del sistema.

Después de haber sintetizado un sistema se procede a evaluar su diseño, por lo general, mediante pruebas de un prototipo o simulaciones en softwares de CAD. Esto es útil para determinar si el diseño satisface la necesidad o requerimientos planteados.

En la Figura 5 se presenta la vista frontal del mecanismo que producirá la rotación tibial. Para este mecanismo se considera utilizar un servomotor con un piñón y corona para trasmitir el movimiento a través del eje de carga axial hacia la platina tibial. Las Figuras 6 y 7 muestran que la platina tibial puede rotar hasta ±25°, por lo que cubre, sin problemas, el rango de rotación de ~ -4 a +6°, establecido en la norma ISO referida [7].

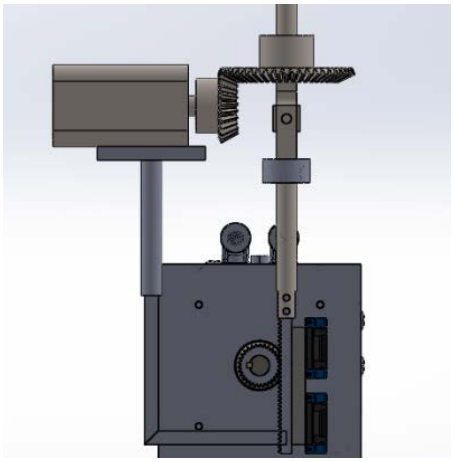


Figura 5. Vista frontal del mecanismo para la rotación tibial.

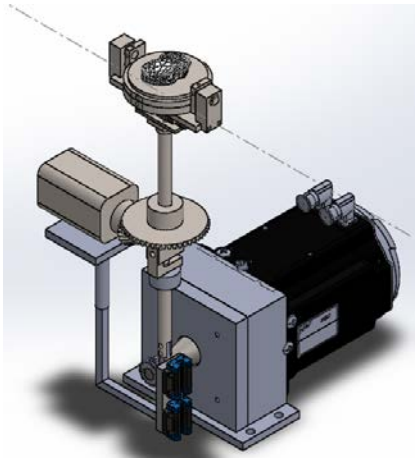


Figura 6. Mecanismo para la rotación tibial en posición 0°.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

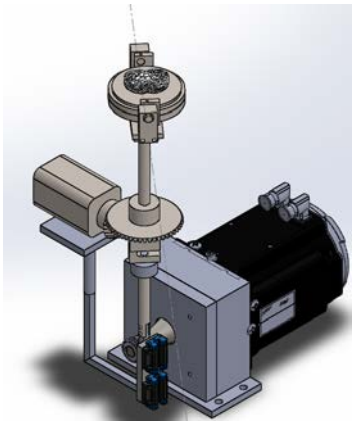


Figura 7. Mecanismo para la rotación tibial con giro de 25°.

El mecanismo diseñado para producir el movimiento antero-posterior consiste de una mesa móvil conectada a un servomotor, Figura 8. Sobre esta mesa está una placa base en la que se encuentra el mecanismo que ejecuta la flexión-extensión del componente femoral, cuyo movimiento se realiza a partir de otro servomotor y un mecanismo de poleas y banda. Dicha placa se monta sobre rodamientos lineales que corren a lo largo de un par de barras guía. Las Figuras 9 y 10 muestran que la platina tibial puede realizar un movimiento antero-posterior de hasta ±50 mm, por lo tanto, puede decirse que se cumple con el rango de desplazamiento de -4 a ~ +0.5 mm, establecido en la norma ISO mencionada [7].

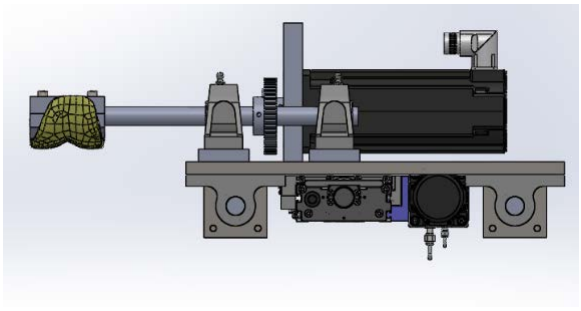


Figura 8. Vista lateral del mecanismo para el movimiento antero-posterior.

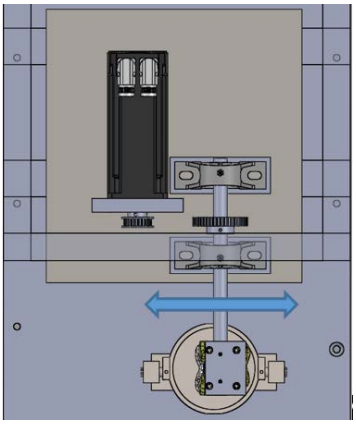


Figura 9. Mecanismo para el movimiento antero-posterior en posición 0.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

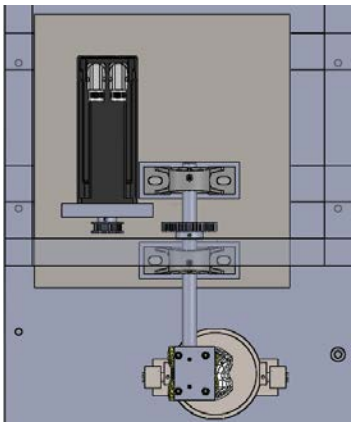


Figura 10. Mecanismo para el movimiento antero-posterior con un desplazamiento de 50 mm hacia la izquierda.

4. Conclusiones

Actualmente el diseño mecánico es más fácil gracias a las herramientas de software para el diseño asistido por computadora (CAD), que ayudan al diseñador a visualizar y probar sus diseños conceptuales por medio de simulaciones virtuales, permitiendo ver los pros y contras antes de fabricar algún elemento físico.

La simulación virtual de los diseños conceptuales de los mecanismos propuestos, revela que éstos superan la magnitud de los desplazamientos establecidos por la norma ISO [7]. El mecanismo de rotación tibial puede rotar ±25° sin ningún problema; mientras que el mecanismo del movimiento antero-posterior tiene un rango de movimiento de ±50 mm. Por lo tanto, se concluye que los mecanismos diseñados realizarían los movimientos requeridos y podrían incorporarse al simulador mecánico, que se desarrolla en el CICATA-Qro, después de realizar un análisis estructural completo y las adecuaciones necesarias.

Agradecimientos

Se agradece a la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional, el financiamiento otorgado a través del Proyecto SIP 20151552.

Referencias

[1] Secretaria de Salud, «*Guías diagnósticas de medicina física y rehabilitación*,» 2015. [En línea]. Available: www. hospitalgeneral.salud.gob.mx/descargas/pdf/area_medica/rehabili/osteoartritis.pdf.

[2] R. Sanjuán Cerveró, P. Jiménez Honradó, E. Gil Monzó y R. &. F. G. J. Sánchez Rodriguez, «*Biomecánica de las prótesis de rodilla*,» *Patologia del aparato locomotor,* pp. 3, 242-259, 2005.

[3] M. Á. Vera, *Modelo físico para evaluar el desempeño tribológico de insertos de (UHMPE) utilizados en prótesis articular de rodilla,* Querétaro, Querétaro, 2014.

[4] J. Hsiung, S. Hsu y J. &. M. T. Liau, «*In-vitro Wear Measurement of Artificial Knee Prostheses,*» *Life Science Journal,* pp. 10, 230-235, 2013.

[5] M. &. T. M. Strickland, «*In-silico wear prediction for knee replacements—methodology and corroboration*,» *Journal of biomechanics, Elsevier,* pp. 42, 1469-1474, 2009.

[6] ISO, *14243-1: 2002 Implants for surgery--wear of total knee joint prostheses--Part, 1,* 2002.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

[7] ISO, *14243-3: 2004 Implants for Surgery. Wear of Total Knee-Joint Prostheses. Loading and Displacement Parameters for Wear-Testing Machines with Displacement Control and Corresponding Environmental Conditions for Test,* 2004.

[8] A. Oliveira, F. Trigo y R. &. C. R. Queiroz, «*Development of a protocol for the performance evaluation of wear machines used in tests of joint prostheses*,» *Mechanism and Machine Theory, Elsevier,* pp. 61, 59-67, 2013.

[9] C. Schroeder, T. M. Grupp, B. Fritz, C. Schilling, Y. Chevalier y S. &. J. V. Utzschneider, «*The influence of third-body particles on wear rate in unicondylar knee arthroplasty: a wear simulator study with bone and cement debris*,» *Journal of Materials Science: Materials in Medicine, Springer,* pp. 24, 1319-1325, 2013.

[10] J. Schwiesau, C. Schilling, S. Utzschneider, V. Jansson, B. Fritz y W. &. G. T. M. Blömer, «*Knee wear simulation under conditions of highly demanding daily activities--influence on an unicompartmental fixed bearing knee design,*» *Medical engineering & physics, Elsevier,* pp. 35, 1204-1211, 2013.

[11] M. C. Anderson, N. A. Brown y K. N. &. M. B. A. Bachus, «*A cadaver knee simulator to evaluate the biomechanics of rectus femoris transfer*,» *Gait & posture, Elsevier,* pp. 30, 87-92, 2009.

[12] L. Gladkis, R. Li, J. Scarvell y P. &. T. H. Smith, «*Exploration of the size, shape and abundance of UHMWPE wear particles using atomic force microscopy,*» *Wear, Elsevier,* pp. 267, 632-638, 2009.

[13] V. Saikko y T. &. C. O. Ahlroos, «*A three-axis knee wear simulator with ball-on-flat contact*,» *Wear, Elsevier,* pp. 249, 310-315, 2001.

[14] R. L. Mott, *Diseño de elementos de máquinas*, México: Pearson Educación, 2006.

[15] S. M. Kurtz, *UHMWPE biomaterials handbook: ultra high molecular weight polyethylene in total joint replacement and medical devices*, Academic Press, 2009.

[16] Ertas, A. Jones, J. C., *The Engineering Design Process,* New York: John Wiley and Sons, 1996.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

10. Desarrollo de un simulador mecánico para probar prótesis articulares de rodilla aplicando la metodología del Modelo W

Aguirre Nájera Adán Enrique, Escobar Medina José Ángel, Barceinas Sánchez José Dolores Oscar, García García Adran Luis, Domínguez López Iván

obarceinas@ipn.mx

Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada Unidad Querétaro, Cerro Blanco N° 141, Col. Colinas del Cimatario, Querétaro, Qro., C.P. 76090

Resumen

En este trabajo se muestra la aplicación de la metodología del Modelo W para desarrollar un simulador mecánico para probar prótesis articulares de rodilla en contacto lubricado. Se realiza un breve análisis de los requerimientos, tomando como referencia los lineamientos de la norma ISO 14243-3:2004 [1] y los requisitos establecidos por los usuarios finales. Se utilizan diagramas de leguaje de modelado de sistemas (SysML) para organizar y representar la información. Partiendo de esto, se definen subsistemas para los cuales se diseñan soluciones particulares.

Habiendo analizado y diseñado cada subsistema, se integran virtualmente para evaluarse como un conjunto y detectar problemas potenciales; esto permite depurar los errores. Luego se procede a realizar el diseño de detalle y fabricación de los subsistemas. Este método garantiza la compatibilidad entre los subsistemas e incrementa las posibilidades de éxito del proyecto.

Palabras clave: prótesis articulares de rodilla, modelo W, simulador mecánico, maestro-esclavo, sistema mecatrónico.

1. Introducción.

Existen varios tipos y modelos de prótesis articulares de rodilla, las cuales se utilizan para someter a desgaste el polietileno utilizado en este tipo de prótesis. Aunque hay simuladores para probar prótesis en condiciones de lubricación, estos no cuentan con la instrumentación y control para medir las fuerzas de fricción de manera sincronizada con los movimientos que ésta realiza [1].

Actualmente, en el Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional Unidad Querétaro, se encuentra en desarrollo un simulador mecánico para probar prótesis articulares de rodilla, el cual debe cumplir los requerimientos establecidos en la norma ISO 14243-3:2004 [2]. Para el desarrollo de esta máquina se aplican las disciplinas de mecánica, electrónica, computación y control; por lo tanto, éste se considera un sistema mecatrónico.

Naturalmente, un sistema formado por la interconexión de un conjunto de componentes diseñados y fabricados aisladamente, no proporciona el mismo nivel de rendimiento que un sistema mecatrónico diseñado, desarrollado e implementado con un enfoque integral. Esto se debe a que la mejor combinación y compatibilidad entre las funciones de los componentes pueden lograrse a través

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

de un enfoque holístico. Generalmente, un producto mecatrónico será más eficiente, rentable, preciso, exacto, confiable, flexible, funcional y mecánicamente menos complejo, en comparación con un producto no mecatrónico que necesita un nivel similar de esfuerzo para su desarrollo [3].

En el método tradicional, cada disciplina desarrolla independientemente la parte del sistema que le corresponde para, posteriormente, integrar un sistema final; sin embargo, de esta forma no se logran diseños de alta calidad, debido a que no se hacen consideraciones simultáneas que afectan todas las disciplinas de la ingeniería involucradas en el sistema [4]. Para el desarrollo del sistema propuesto se aplica la metodología del Modelo W utilizando el Lenguaje de Modelado de Sistemas (SysML) para organizar la información.

2. Metodología

Para el desarrollo de sistemas mecatrónicos comúnmente se utiliza la metodología del modelo V. Éste describe el desarrollo de sistemas basado en un análisis sistemático de las necesidades y requerimientos, así como en un reparto de tareas entre las disciplinas individuales. El diseño de detalle se realiza en paralelo y de manera auto-dependiente en las diversas disciplinas involucradas. Tras la conclusión de las actividades de desarrollo, los resultados de las diversas disciplinas se integran a los subsistemas y sistemas, verificándose al final para asegurar el cumplimiento de los requisitos establecidos en un principio [5].

Sin embargo, parece que este enfoque a menudo conduce a problemas en la fase de integración [6]. Debido al desarrollo independiente, los requerimientos específicos de cada disciplina se cumplen, pero los subsistemas no pueden integrarse fácilmente con los demás, a causa de la falta de comunicación de los resultados y datos durante el desarrollo paralelo, por lo tanto, la consecuente integración hace al proceso ineficiente en tiempo y costo.

A fin de permitir una adaptación permanente de los resultados entre disciplinas, Nattermann propuso el Modelo W [7], que mejora la integración virtual de subsistemas durante el desarrollo de un sistema. El desarrollo que se presenta en este trabajo se basa en este modelo W, Figura 1, pero ampliando sus fases para adaptarlo al desarrollo de sistemas mecatrónicos. Para representar y organizar la información del sistema se utilizan diagramas de Lenguaje de Modelado de Sistemas (SysML) [8].

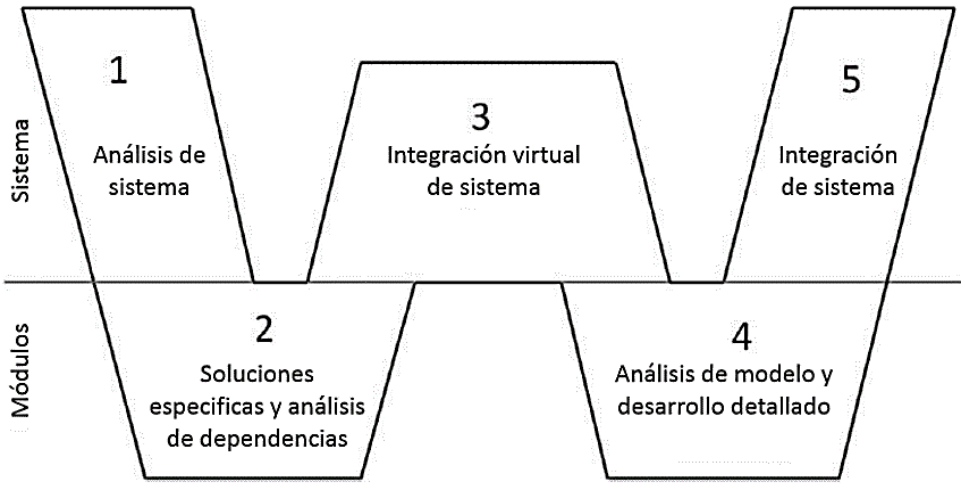


Figura 1. Modelo W.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

3. Diseño e implementación

3.1 Análisis del sistema

A partir de la definición de los requisitos establecidos por los usuarios finales y de los establecidos por la norma ISO [2], se elaboraron informes de requerimientos, así como diagramas de casos, Figura 2. Esto permitió tener la información más clara y ordenada para así disminuir interpretaciones erróneas al momento de distribuirla y realizar el diseño del sistema.

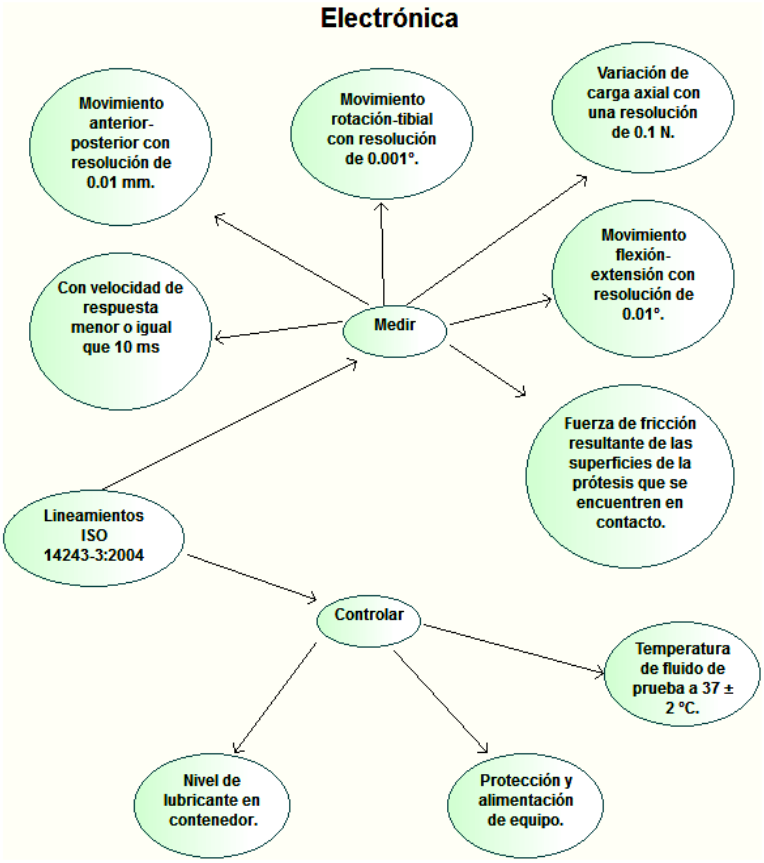


Figura 2. Diagrama de requerimientos.

Habiendo definido los requisitos generales del sistema, se procede a establecer los requisitos para cada subsistema, para después analizar y diseñar soluciones que deberán realizar cada una de las diciplinas que desarrollan el sistema mecatrónico. Para esto se utlizan diagramas de actividad, los cuales resultan de gran utilidad para representar las tareas que debe realizar cada subsistema durante la operación. En la Figura 3 se muestran las actividades que realiza cada subsistema durante un ciclo de movimiento automático. De esta forma es claro qué actividad debe realizar el usuario, la interfaz de control, los controladores y el subsistema electrónico.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

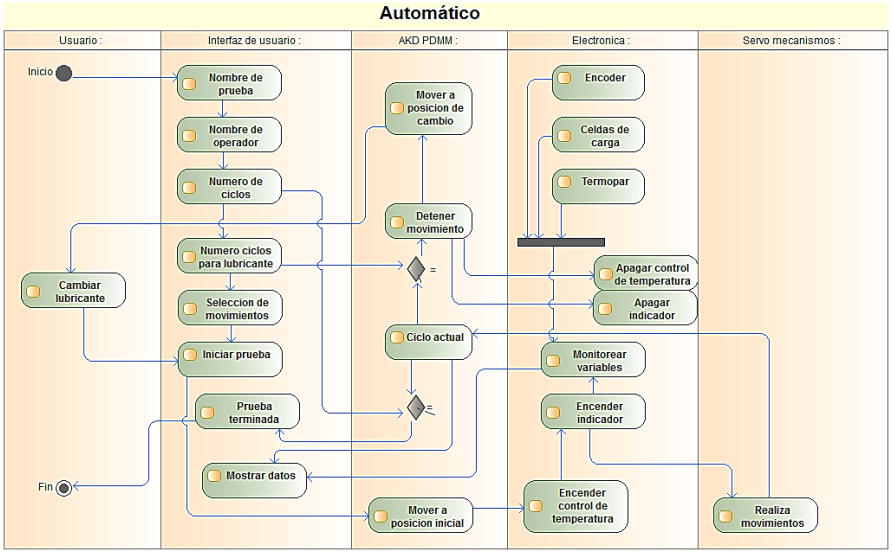


Figura 3. Diagrama de actividad.

3.2 Soluciones especificas

3.2.1 Diseño mecánico

Según los lineamientos de la norma ISO [2], los simuladores para probar prótesis articulares de rodilla *in vitro*, deben replicar los movimientos que ejecuta ésta *in vivo* durante el ciclo de la marcha. En esta norma se establecen tres movimientos de flexión-extensión, antero-posterior y rotación tibial, además de variación de la carga axial, Figura 4,

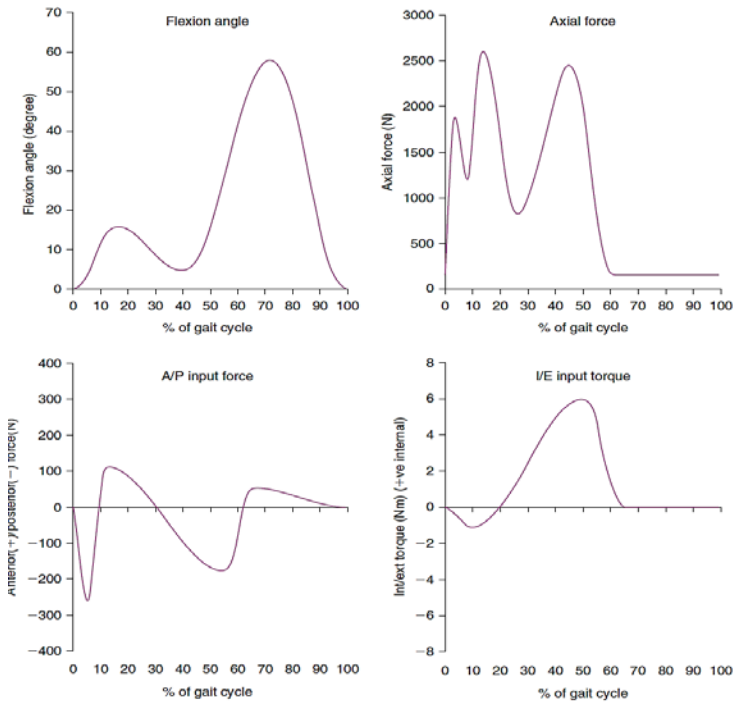


Figura 4. Movimientos y variación de carga establecidos en la norma ISO 14243-3:2004.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

En esta primera etapa solo se diseñaron los mecanismos para el movimiento flexión-extensión y variación de carga, en una segunda etapa se integrarán los mecanismos faltantes. El movimiento flexión-extensión tiene un rango de movimiento de 0° a 58°, por lo tanto, se utiliza un servomotor con un mecanismo de poleas y chumaceras de precisión. La variación de carga tiene valores pico de hasta 2600 N, por lo que se optó utilizar un servomotor de flecha hueca que para acoplarlo al simulador se diseñó y fabricó una caja de rodamientos de alta precisión; la transmisión del movimiento se realiza de forma lineal a través de un mecanismo de piñón-cremallera. El montaje de los mecanismos y actuadores se realizó sobre una estructura de PTR, la cual se diseñó para maximizar su rigidez. En la Figura 5 se muestra el diseño mecánico que se realizó en esta etapa.

3.2.2 Diseño de control electrónico

Los servomotores se controlarán mediante *drives* denominados AKD™ de la marca Kollmorgen™. Se seleccionaron dispositivos de esta marca debido a su versatilidad, confiabilidad y precisión. El control del simulador tendrá una configuración maestro-esclavo, un AKD-PDMM™ funcionará como maestro y tres AKDs como esclavos. El maestro y los esclavos se comunicarán mediante el protocolo EtherCAT, mientras que la comunicación entre el maestro y el usuario será a través de una PC mediante el protocolo Ethernet IP. Para controlar la temperatura del lubricante se utilizará un controlador marca Watlow™, el cual se comunicará con la PC mediante RS485 Modbus RTU. En la Figura 6 se muestra el diagrama de comunicación entre la PC y los controladores.

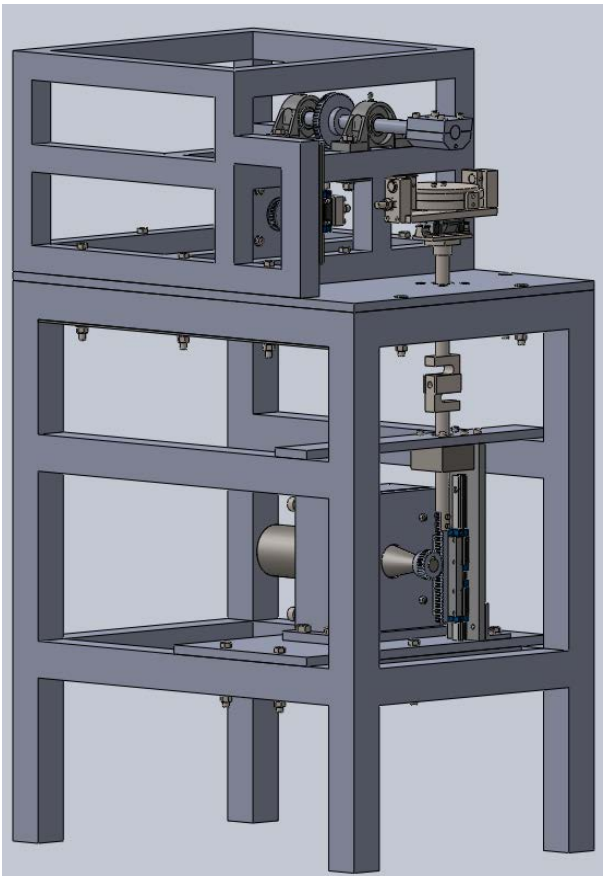


Figura 5. Diseño mecánico.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

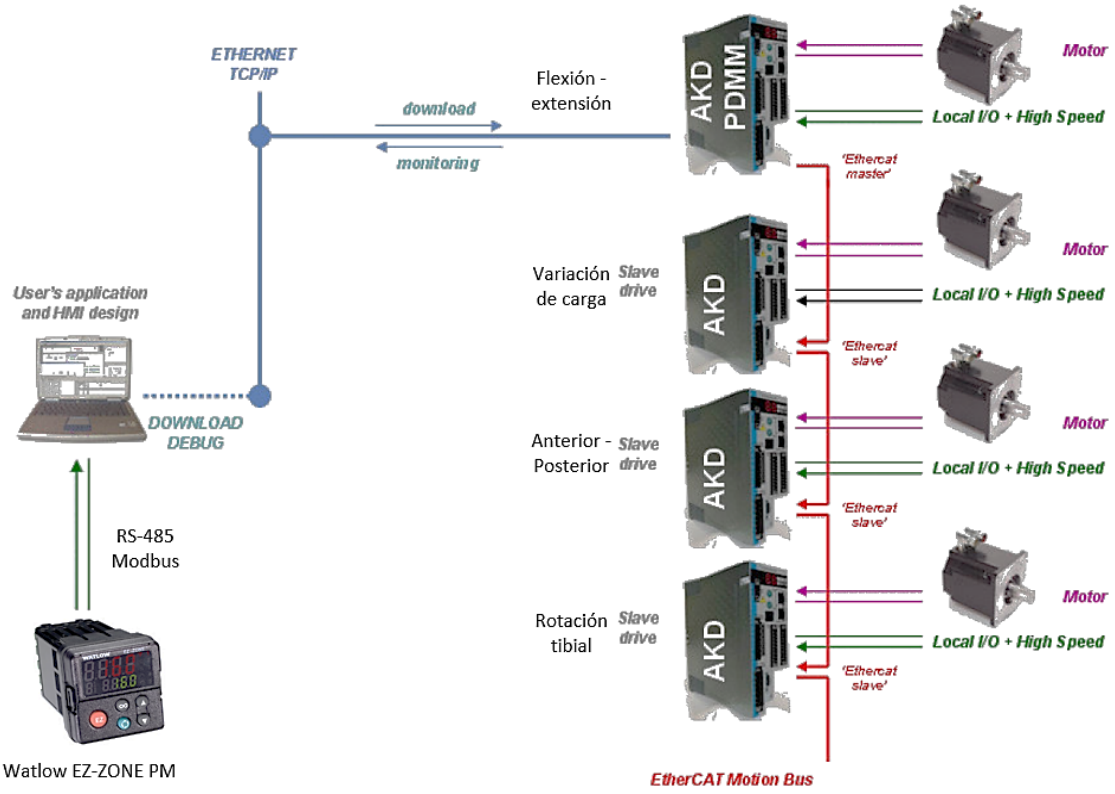


Figura 6. Diagrama de comunicación.

La fuerza axial se medirá mediante una celda de carga tipo S de 500 lb, la cual retroalimenta al control para ajustar la corriente aplicada por el servmotor para de esta forma seguir el perfil de variación de carga establecido por la norma ISO [2]. La posición angular del movimiento flexión-extensión se mide utilizando el encoder de alta presición integrado al servomotor. La fuerza de fricción resultante entre los componentes de la protesis se medirá usando una celda de carga tipo S de 300 lb. Esta información se utlizará para obtener el coeficiente de fricción.

3.2.3 Diseño computacional

La interfaz de control de usuario muestra el estado del sistema en todo momento y permite seleccionar el modo de operación, definidos como: automático, manual y calibración. En la Figura 7 se observa el panel de control, en cual el monitoreo del sistema se ubica en el lado izquierdo y el control en el derecho. El modo manual se utiliza para mover los servomotores una distancia determinada para realizar operaciones de mantenimiento y ajuste del equipo. El modo automático es más complejo debido a que se tienen que seguir los perfiles específicos de los movimientos y carga aplicada establecidos en la norma ISO [2]; en este modo se establece el número de ciclos a realizar, qué movimientos ejecutar, temperatura y tiempo para reemplazar el lubricante. El modo calibración se utiliza para verificar y calibrar los servomotores y sensores del simulador de forma automática.

3.2.4 Integración virtual

Una vez que se tienen propuestas de solución que satisfacen los requerimientos establecidos para cada subsistema, se procede a realizar la integración virtual del sistema, Figura 8. Esto brinda la oportunidad de corregir errores o incongruencias que hayan surgido entre las disciplinas, lo cual evitará el desperdicio de tiempo y recursos por cuestiones que no se detectaron a tiempo en el proceso de diseño de los subsistemas.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

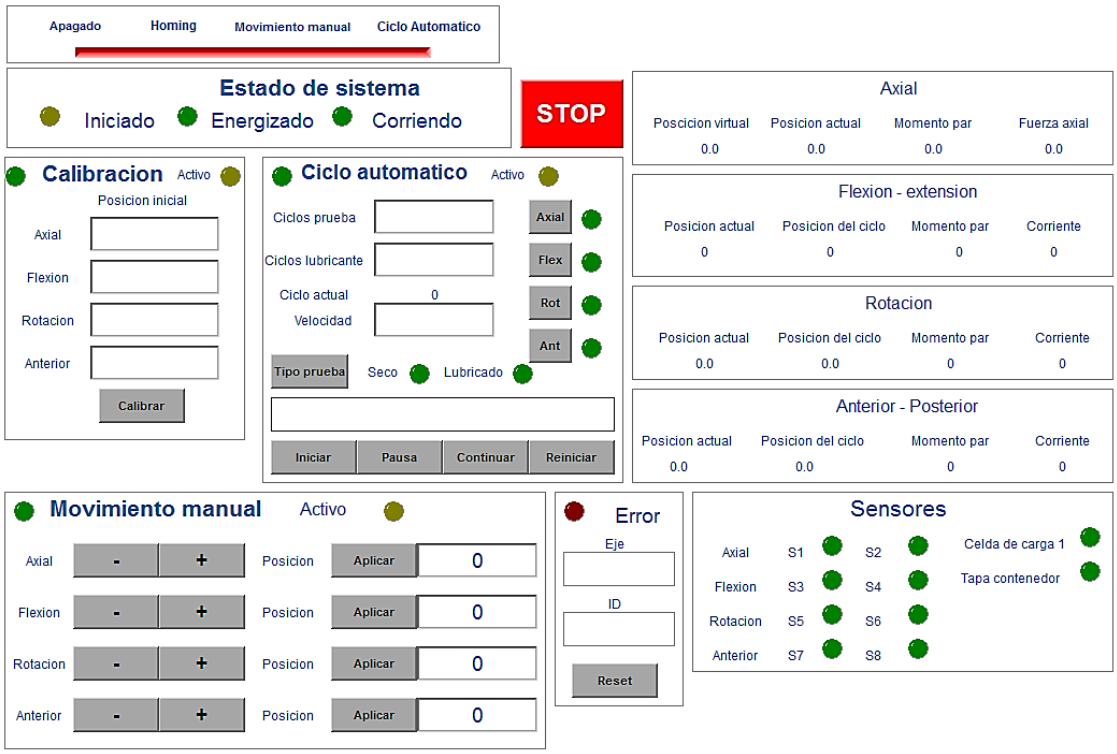


Figura 7. Interfaz de control.

3.2.5 Análisis y diseño de detalle

Habiendo solucionado los problemas detectados en la etapa anterior, se realiza el diseño de detalle y actualiza la integración virtual en busca de nuevos problemas. Este proceso se vuelve cíclico hasta que se minimizan los errores de integración y/o por falta de comunicación entre los involucrados de las diferentes disciplinas.

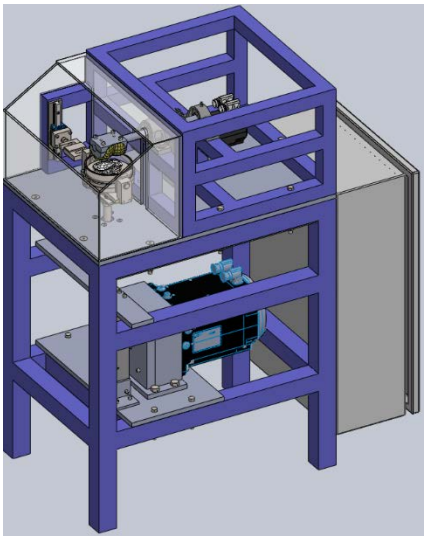


Figura 8. Integración virtual.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

4. Pruebas y resultados

Después de realizar un cuidadoso análisis y depuración de errores, se ha fabricado parte del subsistema mecánico del simulador de CICATA-Qro, Figura 9. Gracias a la metodología aplicada se han presentado errores mínimos de compatibilidad entre los componentes. Actualmente se desarrollan los subsistemas electrónicos y de control para su futura integración.

Hasta ahora ha sido posible obtener resultados preliminares realizando pruebas en vacío. En la Figura 10 se observa el comportamiento de la variación de carga. Las líneas rojas representan los límites inferior y superior de la carga, la línea azul el perfil deseado y la de color negro representa los datos obtenidos, los cuales están dentro del rango de operación permitido; sin embargo, es evidente que aún puede mejorarse. Debido a esto, aún se trabaja en los detalles del subsistema de control.

Figura 9. Avance en el desarrollo del subsistema mecánico del simulador.

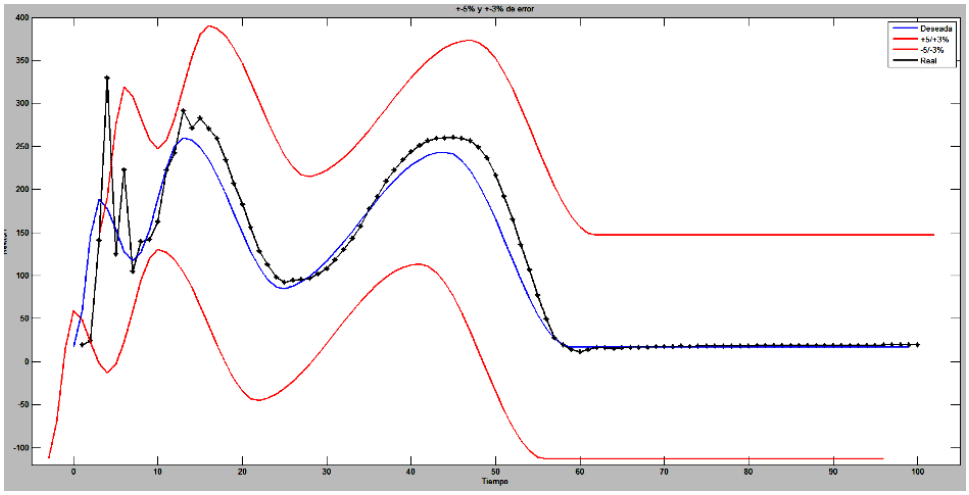


Figura 10. Comportamiento de la variación de carga durante una prueba en vacío.

5. Conclusiones

La aplicación de la metodología del Modelo W al desarrollo de sistemas, ayuda a evitar o reducir los problemas que se presentan durante las etapas de manufactura e integración, evitando así pérdidas de tiempo y recursos materiales. En este trabajo se demuestra que realizar un proyecto multidisciplinario utilizando la metodología del modelo W, permite obtener resultados satisfactorios al minimizar la cantidad de errores por compatibilidad entre los componentes de los subsistemas, haciendo más eficiente el uso del tiempo y recursos. Por lo tanto, se recomienda la aplicación de esta metodología para desarrollar sistemas tecnológicos multidisciplinarios.

Agradecimiento

Se agradece a la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional, el financiamiento otorgado a través del Proyecto SIP 20151552.

Referencias

[1] Haider, H., 2009. *Tribological assessment of UHMWPE in the knee*. In: Kurtz, S.M. (Ed.), UHMWPE Biomaterials Handbook, 2nd edition, Elsevier, China, pp. 381–406.
[2] ISO 14243-3, 2004. *Implants for surgery - Wear of total knee-joint prostheses - Part 3: Loading and displacement parameters for wear-testing machines with displacement control and corresponding environmental conditions for test.* International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
[3] De Silva C., *"Mechatronics an integrated approach"*, CRC Press, 2005
[4] Giacomo Barbieri, Cesare Fantuzzi, Roberto Borsari, "*A model-based design methodology for the development of mechatronic systems"*, Mechatronics, Elsevier, 833-843, 2013.
[5] VDI - Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik, *"Design methodology for mechatronic systems"*, Verein Deutscher Ingenieure (VDI) VDI 2206, Beuth, Berlin, Germany, 2004
[6] ProSTEP iViP Association, "*Mechatronic Process Integration (MPI)"*, Final Report, ProSTEP iViP Documentation, Darmstadt, Germany, 2009
[7] Nattermann R, Reiner A. "*Approach for a data management-system and a proceeding-model for the development of adaptronic systems*", International mechanical engineering congress and exposition (ASME), Vancouver; 2010.
[8] Friedenthal, S.; Moore,A. & Steiner, R., "*A practical guide to SysML: the systems modeling language",* Morgan Kaufman, 2014

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

11. Automatización de equipo para pruebas de erosión por impacto de partículas sólidas mediante un controlador lógico programable

Gómez Pérez Víctor Alfonzo[2], Aguirre Nájera Adán Enrique[1], Escobar Medina José Angel[1], Barceinas Sánchez José Dolores Oscar[1], Domínguez López Ivan[1]

obarceinas@ipn.mx

Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada Unidad Querétaro, Cerro Blanco N° 141, Col. Colinas del Cimatario, Querétaro, Qro., C.P. 76090[1]

Universidad Politécnica de Santa Rosa Jáuregui, Km 31 + 150 Carretera Federal 57 Qro. – SLP, Santa Rosa Jáuregui, Querétaro, C.P. 76220[2]

Resumen

Uno de los principales intereses cuando se realizan pruebas experimentales es lograr la repetibilidad de las condiciones de operación del equipo que se utiliza. Aunado a esto, la norma ASTM G76-07 establece lineamientos laxos respecto a las condiciones en las que un equipo para pruebas de erosión debe operar.

En este trabajo se presenta la automatización de un equipo para realizar pruebas de erosión por impacto de partículas sólidas impulsadas por flujo de aire a presión. Este tipo de equipo se utiliza para evaluar la resistencia de los materiales a la erosión. Inicialmente, el manejo de éste era de forma manual, lo que hacia su operación lenta e ineficiente. Debido a esto, surgió la necesidad de implementar un sistema de control automatizado, para el cual se incorpora un controlador lógico programable (PLC). Para el desarrollo del control se siguió una metodología para automatización de sistemas, la cual incluye la elaboración de diagramas de comportamiento. Adicionalmente, se diseñaron y desarrollaron tres subsistemas que posteriormente se integraron. También se presenta el diseñó y construcción de un dispositivo de dosificación que permite regular el flujo de partículas de arena.

Con la integración de los subsistemas e implementación del sistema de control, puede garantizarse la repetibilidad en el ajuste de las condiciones de operación del equipo para pruebas de erosión por impacto de partículas sólidas.

Palabras clave: pruebas de erosión, control, automatización, PLC.

1. Introducción

La erosión es un mecanismo de desgaste que ocurre por el impacto repetido de partículas, sólidas o líquidas sobre una superficie, y al igual que otros mecanismos, la erosión produce pérdida progresiva de material, la cual aumenta conforme la cantidad de partículas que impactan se incrementa. La cantidad de material removido depende de: forma, tamaño y velocidad de las partículas; propiedades físicas de la superficie y de las partículas; y ángulo y distancia de impacto [1].

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

La norma ASTM G76-07 establece los lineamientos para realizar pruebas de erosión por impacto de partículas sólidas. También emite recomendaciones generales sobre el diseño y operación de los equipos para realizar pruebas, pero debido a que éstas no cubren todos los aspectos, p. ej., la manera de como dosificar las partículas sólidas, se advierte que los resultados que se obtengan solo son útiles para categorizar internamente los materiales probados. Además, no menciona cuál es la velocidad de las partículas proyectadas por el cañón de disparo ni cuánto debe durar una prueba [2].

Actualmente, en el Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional Unidad Querétaro (CICATA-Qro), se tiene un equipo para realizar pruebas de erosión por impacto de partículas sólidas acarreadas por un chorro de aire; en este caso se utiliza arena sílica. Sin embargo, el manejo de este equipo se realiza de manera manual, por lo que existe el riesgo de que no haya repetibilidad de las condiciones de operación.

Con el propósito de superar dicho inconveniente, se realizó la automatización de este equipo, para lo cual se aplicaron conocimientos de mecánica, electrónica, neumática y programación. Debido a su robustez y facilidad de implementación para la automatización de sistemas, se utiliza un PLC, para realizar las funciones de control [3].

2. Metodología

Para la automatización del sistema se siguieron los siguientes pasos:

1. Requerimientos del sistema
2. Diseño de diagramas de comportamiento
3. Selección de componentes
4. Integración
5. Verificación

En el primero, se definen los requerimientos del equipo con base en las necesidades del usuario. Con la información recopilada, se diseña el diagrama secuencial de comportamiento GRAFCET [4], para establecer el comportamiento deseado. Entonces, se procede a realizar los diagramas de entradas y salidas, eléctricos y neumáticos necesarios, para definir las características de cada subsistema. Hecho esto, se procede a integrar el sistema, que incluye la programación del PLC. Finalmente, se verifica el funcionamiento del equipo.

3. Desarrollo

A partir de los requerimientos del equipo, se realizó el diagrama GRAFCET que se muestra en la Figura1. En éste se establece la secuencia del comportamiento deseado del sistema durante la ejecución del proceso de prueba. Con base en esto, se establecieron las entradas y salidas, las cuales se representan gráficamente mediante el diagrama de la Figura 2. Éste puede parecer redundante, sin embargo, permite ver de forma clara y precisa las variables a controlar y monitorear, por lo que ayuda a disminuir la probabilidad de errores.

Establecido el comportamiento y las entradas y salidas, se procedió a diseñar los diagramas de los subsistemas eléctrico y neumático. Primero se elaboró el diagrama eléctrico, Figura 3, en el que se ubican todos los componentes necesarios; éste es de gran utilidad ya que es posible detectar y corregir posibles errores, además de que especifica con detalle las características técnicas de los componentes. Algunos de los componentes que se utilizan son: electroválvulas, válvulas neumáticas, indicadores,

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

relevadores e interruptores. Gracias a esto se detectó la necesidad de construir un circuito para controlar el subsistema de dosificación de partículas.

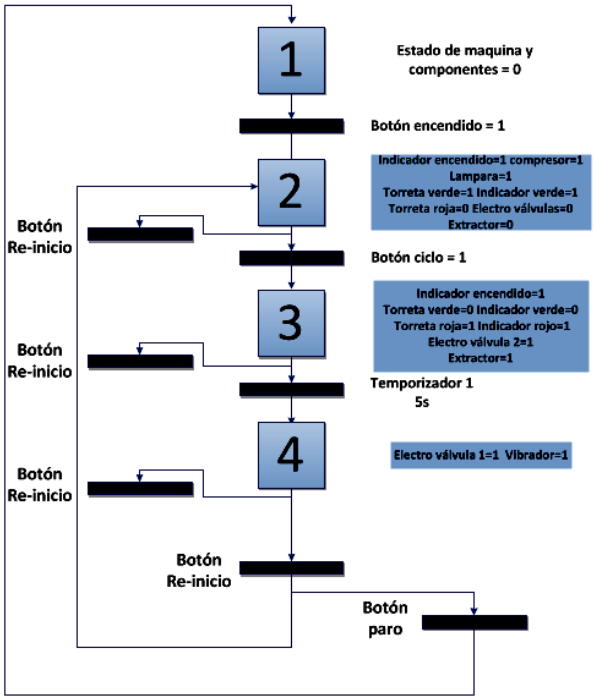


Figura 1. Diagrama GRAFCET

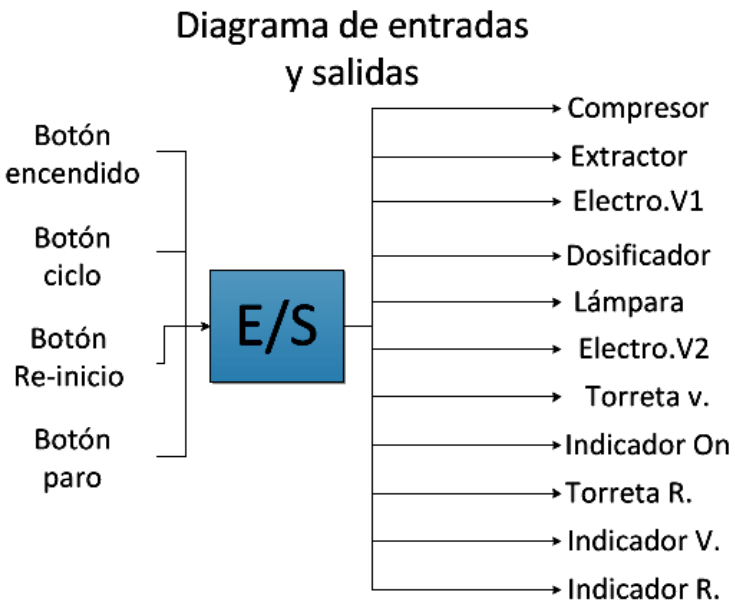


Figura 2. Diagrama de entradas y salidas.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

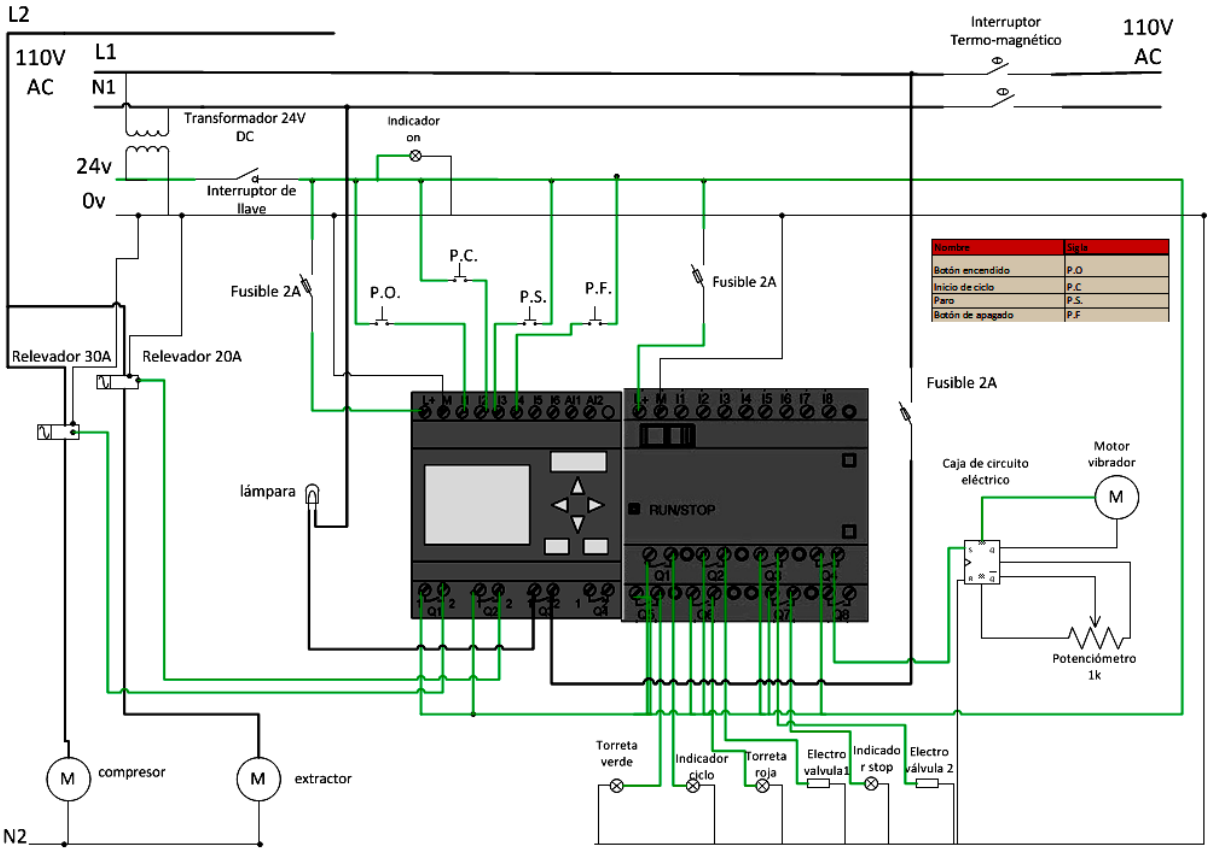


Figura 3. Diagrama eléctrico

El equipo para pruebas de erosión utiliza un cañón de disparo, en el cual se introducen las partículas de arena mediante un flujo de aire a presión Este flujo acarrea la partículas y las impacta contra la superficie de la muestra a una velocidad de aproximadamente 210 m/s. El paso de aire hacia el cañón se controla mediante una válvula neumática 2/2. Para evitar la saturación del interior de la cámara de prueba con partículas y polvo, se tiene un subsistema de extracción, que consiste de un ventilador centrífugo movido por un motor eléctrico de ½ HP, una válvula neumática 2/2 que permite el flujo del aire que se extrae, y una caja de filtros.

Debido a que las válvulas neumáticas se operan mediante válvulas solenoide 3/2, fue necesario diseñar un subsistema neumático. En el diagrama correspondiente, Figura 4, se utiliza simbología de las normas DIN/ISO 1219 [5]. Se realizaron simulaciones para verificar el funcionamiento de este subsistema. Para evitar la entrada de humedad y otras impurezas se instalaron un estrangulador de flujo y dos unidades de mantenimiento.

Habiendo hecho la descripción del sistema y los diagramas del proceso de prueba, se realizó la selección de los componentes. En la Figura 5 se enlistan y mencionan las especificaciones de cada uno.

El dispositivo originalmente instalado para dosificar arena, se obstruía debido a que el tornillo sinfín se atoraba por acumulación de arena. Esto impedía controlar el flujo de partículas. Por lo tanto, se decidió diseñar e implementar un subsistema de dosificación, el cual utiliza vibración mecánica y aprovecha la gravedad para hacer fluir las partículas de arena desde un bulbo de vidrio hacia un embudo conectado al cañón de disparo. Para esto se colocó sobre el bulbo un motor de corriente directa (CD) con un contrapeso excéntrico en su eje, Figura 6. El soporte para sujetar el motor se diseñó y fabricó en polímero ABS mediante impresión 3D.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

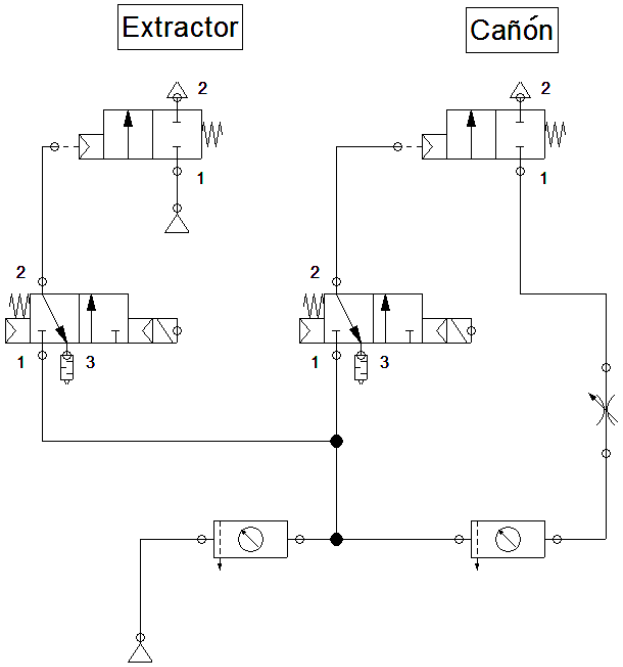


Figura 4. Diagrama neumático.

Componente	Símbolo	Características
Compresor		2 HP, 110 V AC, 19,5 A , CAP. 130 PSi
Extractor		0.5 HP, 110V AC, 8,5A
Lámpara		110V AC, 0.035A
Electroválvula 3/2		24V DC, 0,021A 0,15-0,7 Mpa
Indicador V		12-30V DC, 0.005A-0,014A
Indicador R		12-30V DC, 0.005A-0,014A
Bulbo torreta verde		24V DC, 0.2A
Bulbo torreta rojo		24V DC, 0.2A
Vibrador		1,5V DC ,2A
Potenciómetro		2500 ohm
Circuito integrado		7805
Relevador 20A		24V DC coil, 250V AC NA
Relevador 30A		24V DC coil, 250V AC NA
Transformador dc		De 110V AC a 24V DC, 5A
Fusible		2A
Interruptor de llave		1A a 24V
Interruptor termo magnetico		110V AC, 35A
Botones (P.O, P.C, P.S,)		NA
PLC Logo 12/24 RC		Siemens 24V DC 10A
Modulo DM16 24 salidas digitales		Siemens 24V DC 10A
Valvulas 2 vias NC (VND200DS)		Smc neumatica 1,5Mpa
Valvulas 2 vias NC (VND700DS-50A)		Smc neumatica 1,5Mpa
Unadad de mantenimiento		filtro regulador y lubricador

Figura 5. Lista y especificación de componentes.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

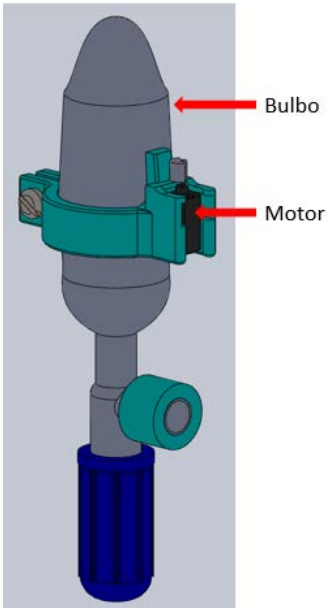


Figura 6. Bulbo de vidrio con el motor de CD.

A fin de mantener un flujo específico de partículas durante una prueba, fue necesario desarrollar un control, el cual consiste de un circuito que permite variar velocidad del motor de CD. Esto se logró mediante la modulación del ancho de pulso (PWM), para lo cual se utilizó un arreglo con un circuito integrado (CI) LM555, Figura7. A través de un potenciómetro el usuario puede variar la velocidad fácilmente.

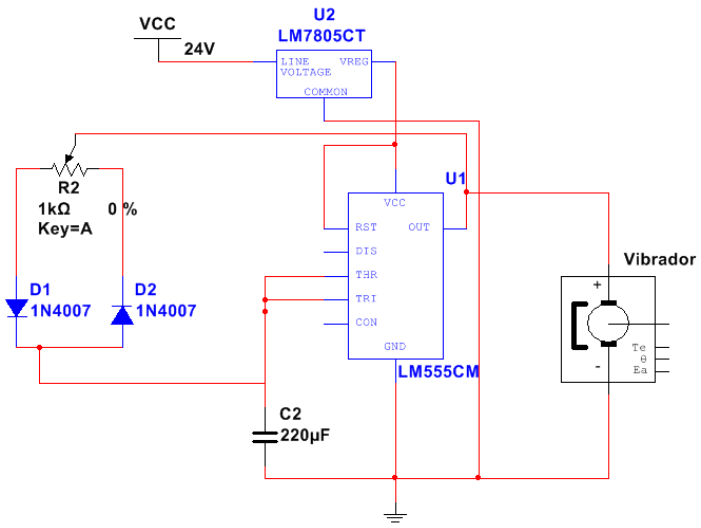


Figura 7. Diagrama eléctrico de control PWM

4. Resultados

Después de realizar el diseño e integración de los distintos subsistemas se logró la automatización del equipo para realizar pruebas de erosión; parte del resultado final se aprecia en la Figura8. Con el

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

sistema de control desarrollado, ahora es posible realizar pruebas de manera más eficiente y, sobre todo, bajo condiciones de operación repetibles.

Figura 8. Equipo de erosion automatizado.

El nuevo dispositivo dosificador, con una capacidad de 20 g de arena, construido e instalado en el equipo puede apreciarse en la Figura 9. Éste puede removerse con facilidad para limpieza y ajuste. El prototipo de circuito para controlar la velocidad del motor de CD puede observarse en la Figura10.

Figura 9. Dispositivo dosificador instalado.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

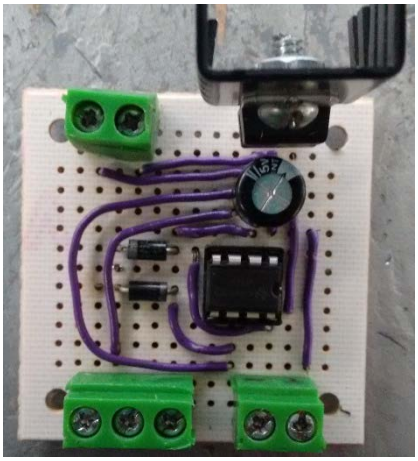


Figura 10. Prototipo de circuito de control de velocidad.

5. Conclusiones

Después de aplicar sinérgicamente disciplinas de ingeniería como electrónica, neumática y programación, se logró automatizar un equipo para pruebas de erosión, el cual se operaba de forma manual. En pruebas realizadas después de la automatización, se percibió una mayor facilidad de operación. El tiempo de preparación y ejecución de una prueba se redujo notablemente debido a que los todos los subsistemas están listos para activarse en el momento indicado.

El subsistema de dosificación actual permite un mejor control del flujo de partículas de arena, debido a que la vibración y la gravedad propician un movimiento libre de éstas. Puesto que todo el proceso de automatización se documentó, es posible realizar actualizaciones o modificaciones del equipo con mayor facilidad.

Agradecimientos

Se agradece a la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional, el financiamiento otorgado a través del Proyecto SIP 20121606.

Referencias

[1] Luengo O.” *Estudio tribológico de fricción y desgaste de capas de aleación NiP”* Escola Tècnica Superior d’Enginyeria Industrial de Barcelona 65, 2008.
[2] ASTM G76-07. Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets.
[3] Frey G. & Litz L. “*Formal methods in PLC programming Systems”* Man, and Cybernetics, IEEE International, Nashville, Tennessee, USA 2431-2436, 2000.
[4] Thomas, B. H. & McLean, C. “*Using grafcet to design generic controllers”*, Computer Integrated Manufacturing, IEEE International, 110-119, 1988.
[5] Guillén A. “*Introducción a la neumática”*, Serie de PRODUCTIVA, Barcelona, 1993.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

12. Convertidor ca-cc del tipo reductor-elevador en cascada para un inversor de un motor sin escobillas

Moreno Guzmán Martin, Hernández Zavala Antonio, Hernández Cruz Noé

martin_more_no@me.com, anhernadezz@ipn.mx

Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Instituto Politécnico Nacional Av. Cerro Blanco #141 Col. Colinas del Cimatario, Querétaro, Querétaro.

Resumen

En éste documento se presenta el diseño estático de un convertidor reductor-elevador basado en el uso de dos MOSFETs que conmutan a una misma frecuencia y en un mismo ciclo de trabajo. La principal aplicación de este convertidor es la administración de voltaje y corriente continua para una futura aplicación en un inversor de un motor sin escobillas. Con este tipo de topología de convertidor se logra que el factor de potencia de la linea no se modifique por los requerimientos de potencia para el motor sin escobillas. Al aplicar la metodología que se describe en éste artículo, se reduce el tiempo de diseño y simulación del convertidor reductor-elevador en casacada. Se seleccionó una frecuencia de 50 kHz para poder utilizar inductancias pequeñas.

1. Introducción

Los motores sin escobillas han aumentado su uso en diferentes aplicaciones como: en coches eléctricos [9], aerospaciales [10],robóticas [11], etc. Los motores sin escobillas tiene las siguientes ventajas: mejor relación velocidad par-relación, mayor respuesta dinámica, mayor eficiencia, mayor vida útil, menor ruido electromagnético y mayor rango de velocidad [12].

Los motores sin escobillas son motores asincronos de imanes permentes en el rotor y devanados sobre el estator. Los motores sin escobillas tienen mayor eficiencia y mejor factor de potencia en menor tamaño comparado con los motores de inducción [1].

Los motores sin escobillas necesitan un control que inyecte una corriente rectangular a los devanados del estator. Para ello se debe diseñar un circuito que sea capaz de suministrar corriente y voltaje constante. Actualmente, existen diferentes enfoques en donde se han utilizado convertidores de corriente alterna a corriente directa sin utilizar un transformador. Se puede distinguir dos enfoques principales:

4. El primer enfoque es utilizar PWM para el control de voltaje y corriente [4]. Este método consiste en activar transistores (BJT, MOSFETS e IGBT) a una frecuencia y con un pulso en alto de trabajo especifico.

5. El Segundo enfoque consiste en utilizar un inductor de un valor de inductancia grande con un SCR en antiparalelo que suministre al motor la cantidad de corriente requerida de manera ininterrupida en un tiempo especifico, cabe resaltar que este tipo de topología no es compacta [5]-[6].

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Es bien sabido, que las fuentes de poder son conectadas a corriente alterna sin corrección de fase lo que provoca armónicos de orden inferior dando como resultado problemas incluyendo la distorsión del voltaje [7]-[8]. Una solución es utilizar convertidores de corriente alterna a corriente continua sin transformador.

En los convertidores de corriente alterna a corriente continua, existen diferentes topologías, incluyendo las convencionales como elevador-reductor, sepic, cuk [2]. Algunas veces, sus componentes magnitudes y capacidades pueden llegar a ser radicalmente grandes y con estrés eléctrico [3].

Actualmente el convertidor reductor-elevador en cascada es utilizado para la inyección de corriente hacia el inversor y este pueda energizar el motor sin escobillas sin afectar el factor de potencia. Con el experimento de la simulación del convertidor reductor-elevador se muestra un tiempo de respuesta rápido. Este convertidor reductor-elevador con respecto a otro trabajo presenta mejoras en los siguientes dos puntos: menor porcentaje de sobre impulso y una menor tiempo de asentamiento, lo que implica que el sistema se estabiliza más rápido.

El artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección dos se describe el funcionamiento de la topología del convertidor reductor-elevador considerando el tiempo de pulso en alto y bajo de los MOSFETs. En la sección tres se menciona la metodología que se utilizó para seleccionar los elementos pasivos del circuito. En la sección cuatro, se presentan los resultados de la experimentación con el convertidor CA-CC, mostrando su comportamiento en simulación. Finalmente se presentan las conclusiones del trabajo.

2. Topología del sistema

Este artículo utiliza el convertidor elevador-reductor en cascada que será aplicado a una futura implementación en un inversor para un motor sin escobillas como se muestra en la Figura 1. Para obtener valores reales y pequeños de capacitancias e inductancias se necesita aumentar la frecuencia de conmutación de los MOSFETs *Mos_Bo* y *Mos_Bu*, cabe resaltar que estos dos mosfets conmutan a la misma frecuencia y ciclo de trabajo.

2.1 Operación principal

La entrada de voltaje es monofásica con una amplitud de 127 volts a una frecuencia de 60 Hz como se muestra en la Figura 1. Para el voltaje de salida se tomará con respecto al capacitor *C*, este tipo de topología tiene dos modos de operación, que se describiran a continuación.

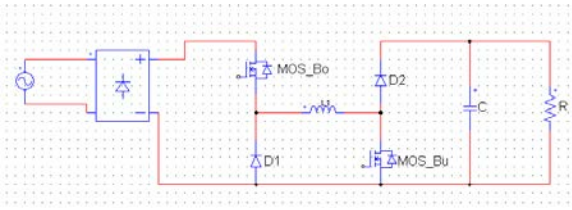


Figura 1. Convertidor elevador-reductor en cascada.

2.1.1 Topología del Ciclo T_{on}

La ecuación matricial (1) describe el comportamiento del circuito de la Figura 2. En el primer renglón de la ecuación matricial está en función del voltaje del inductor *L,* el segundo renglón de la ecuación matricial está en función de la corriente del capacitor *C* aparece el voltaje de salida *Vo* porque este voltaje es igual al voltaje del capacitor *C*.

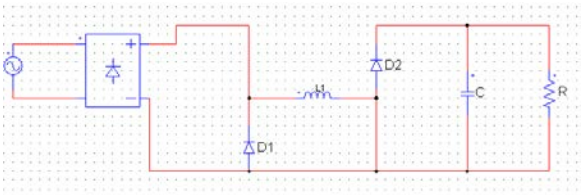


Figura 2. Convertidor elevador-reductor en cascada con pulso en alto.

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_L \\ \frac{d}{dt} V_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_i \quad (1)$$

Cuando el ciclo de trabajo los mosfets *Mos_Bo* y *Mos_Bu* se encuentra en un ciclo de trabajo en alto Ton, la corriente del inductor i_L almacena energía eléctrica en forma de campo magnético. Según la ley de Lenz, el capacitor *C* almacena energía eléctrica en forma de campo eléctrico.

3.1.1 Topología del Ciclo T_{off}

De acuerdo con la Figura 3, cuando los mosfets *Mos_Bo* y *Mos_Bu* se encuentra con un pulso en bajo *Toff*, Mos_Bo y Mos_Bu entregan la energía eléctrica que almacenaron durante el ciclo de trabajo en alto Ton, estos ciclos de trabajo *Ton* y *Toff* a cierta frecuencia *f* generan a la salida un voltaje y corriente de rizado.

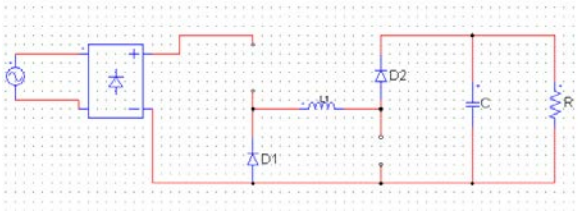


Figura 3. Convertidor elevador-reductor en cascada con pulso en bajo

3. Diseño de Convertidor reductor-elevador en cascada

A continuación, en la Tabla 1, se establecen los parámetros de funcionamiento necesarios, para calcular los componentes que integran el convertidor y establecen las condiciones del mismo.

Tabla 1. Datos iniciales para el diseño de convertidor

Característica	Magnitud
P_0 *[W]*	500
I_{out} *[A]*	4
V_{max} *[V]*	160
L_{rizado} *ΔiL [%]*	1
C_{rizado} *ΔVc [%]*	1
f [KHz]	50

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Para el cálculo de los componentes del convertidor se debe tomar en cuenta:

1. Corriente eficaz y corriente pico en el inductor
2. Rizado máximo deseado en la corriente del inductor
3. Rizado máximo permitido en el voltaje de salida (voltaje en el capacitor de salida).

3.1.1 Cálculo del inductor

Para realizar los calculos se consideran las Ecuaciones (2) y (3), donde *Vin* es el voltaje deentrada y *Dc* es el ciclo de trabajo.

$$V_{in} = \frac{V_{out}}{1 - D_c} \tag{2}$$

$$L = \frac{1}{2\Delta i_L} \frac{V_{out}^2}{I_{out} V_{in} f} D_c \tag{3}$$

Mediante la Ecuación (4) se obtiene el capacitor de salida de acuerdo a la frecuencia que se desea trabajar de manera similar como ser realizo con el inductor.

$$C = \frac{1}{2\Delta V_C} \frac{I_{out}}{V_{in} f} D_c \tag{4}$$

4. Simulación del convertidor reductor-elevador en cascada

En la Figura 4, se muestra el esquema general realizado mediante PSIM para el modo de operación. Se muestra cada uno de los valores de capacitancia e inductancia que se utilizaron para obtener la frecuencia de operación previamente seleccionada en la tabla 1.

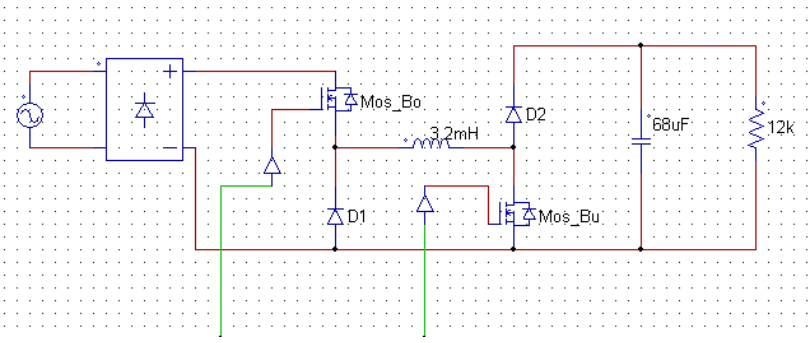


Figura 4. Convertidor elevador-reductor en cascada con sus respectivos valores

En la Figura 5 se observa la gráfica del voltaje de salida a través del capacitor electrolítico de 68 microfaradios, el sobre impulso es de 170 volts y se estabiliza a partir de los 500 milisegundos, el voltaje promedio es de160.5 Volts.

El voltaje rizo en el capacitor 68 microfaradios se muestra en la Figura 6, en donde se aprecia la variación de voltaje que cumple con las expectativas del cálculo que se llevó previamente. El voltaje máximo es 161.5 volts y voltaje mínimo es 159.5 volts, teniendo una desviación de de 1 volt.

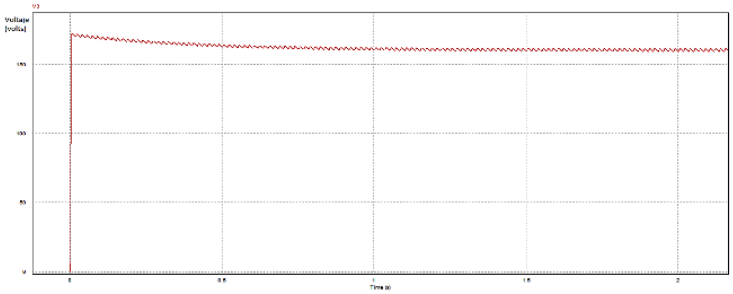


Figura 5. Gráfica de voltaje de Salida Vout

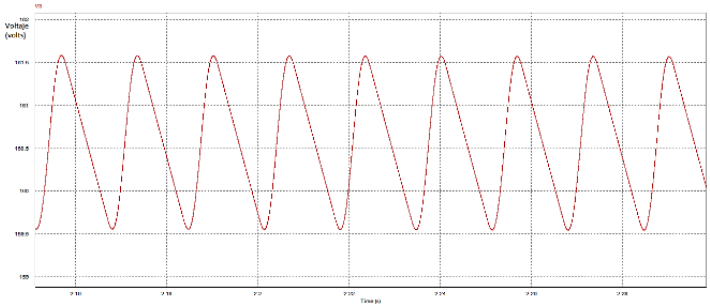


Figura 6. Gráfica de voltaje de rizo en la Salida

En el trabajo [13] realizan simulaciones con diferentes configuraciones del convertidor reductor-elevador su diseño presenta un porcentaje de sobre impulso del 25% y tiempo de asentamiento de 800 milisengundos, con nuestros resultados mejoramos el porcentaje de sobre impulso a 6.25% y el tiempo de asentamiento en 400 milisegundos, aunque el convertidor que presentamos se voltaje rizo mayor con respecto al tabajo que se comparó.

5. Conclusión

La utilización de convertidores CA-CC(sin transformador) para inversores de motores sin escobillas se ha incrementado debido a que en simulación muestran una facilidad de implementación, los convertidores presentan menor cantidad de ruido implicando una mejor calidad de energía y sin afectar el factor de potencia de las lineas de transmisión.

En este artículo se mostró un diseño estático básico de un convertidor reductor-elevador en cascada, un análisis sobre la topología del sistema que explica el funcionamiento subdividiendolo en dos modos de operación e incluyendo una simulación de un convertidor reductor-elevador en cascada, la simulación muestran un comportamiento estable a pesar de la naturaleza no lineal del sistema.

Se alcanza el objetivo del voltaje requerido para su futura implementación en un motor sin escobillas con un rápida estabilización del convertidor. Este convertidor presenta pequeñas variaciones de voltaje de aproximadamente del mas/menos un volt y con la disponibilidad de exigencia de corriente de 4 amperes. Como trabajo futuro, se fabricará el convertidor incluyendo un control analógico que

mejorará la administración de energía cuanto se tenga la carga dinámica (el motor sin escobillas en operación) que implica un aumento en la administración de corriente y voltaje sobre el inversor.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero proporcionado por el Instituto Politécnico Nacional y el CONACYT.

Referencias

[1] Jensen. C.C, *"A low-loss permanent-magnet brushless DC motor utilizing tape wound amorphous iron",* IEEE Transactions on Industry Applications, pp 646 - 651 Vol. 28, USA, 1998.
[2] Chen, J., Maksimovic, D., Erickson R., "*Buck-Boost PWM converters having two independently controlled switches*", IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference, pp 736-741 Vol.2, Canadá,2001.
[3] Jingquan, Ch., Dragan, M.,"*Analysis and design of a low-stress buck- boost converter in universal-input PFC applications*",IEEE Transactions on Power Electronics. Vol. 21, pp. 320-329,2006, USA, 2006.
[4] Bose, B.K., *"Power Electronics and Variable Frequency Drives",* Wiley-IEEE Press, USA,1996.
[5] Waikar, S.P.,Toliyat, H.A., Ba-Thnnya A.S., Moreim, J.C., and Zhang, Z., *"A Novel Thyristor-Based Brushless DC Motor Drive for Low Cost Applications"*, Proceedings of the 2001 Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2001), pp. 434-439 Vol.1, Anaheim, CA.,2001.
[6] Chem, T.L.,Chang, J., Cbang, G.K., *"DSP-based integral variable structure model following control for brushless DC motor drivers"*, IEEE Trans. on Power Electronics, pp. 53-63 Vol. 12, San Diego, CA., 1997.
[7] Ridley, R.,Kern, S.,Fuld, B., *"Analysis and design of a wide input range power factor correction circuit for three-phase application*", Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp. 299-305, San Diego, CA., 1993.
[8] Zhou, C., Ridley, R.B., Lee, F.C., *"Design and analysis of a hysteretic boost power factor correction circuit",* Power Electronics Specialists Conference, pp. 800-807, San Antonio, TX USA, 1990.
[9] Satria, A, Farisi, V., Rizqiawan, A., Heryana, N., Purwadi, A., *"Synthesis Modeling of 10 kW BLDC Controller for City Electric Car Based on PSIM"*, Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE), pp. 251 – 256, Bali, 2014.
[10] Rinku, R.S., Reeba, S.V., *"A Dual Layer Field Coil Assisted BLDC Machine for Aerospace Applications"*, Advances in Green Energy (ICAGE), pp. 150 – 157, Thiruvananthapuram, 2014.
[11] Sensinger, J.W., Clark, S.D., Schorsch, J.F., *"Exterior vs. Interior Rotors in Robotic Brushless Motors"*, 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation Shanghai International Conference Center, pp. 2764 – 2770, Shanghai, 2011.
[12] Kusko, A., Peeran, S.M., *"Definition of the brushless DC motor"*, Industry Applications Society Annual Meeting, pp. 20 - 22 Vol.1, Pittsburgh, USA, 1998.
[13] Mingzhi, H., Zhang, F., "High-efficiency two-switch tri-state buck–boost power factorcorrection Inverter with fast dynamic response and low-inductor current ripple", Power Electronics, IET, Volumen 6, pp. 1544 – 1554, 2013.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

13. Diseño Mecatrónico de un Robot de Tres Grados de Libertad Aplicando la Metodología de Nigel Cross

Morgado González Irving, Xicoténcatl Pérez Juan Manuel, Ordaz Oliver Jesús Patricio, Flores Isidro Anylí

imorgadog@hotmail.com, jmxico@upp.edu.mx, patricio@upp.edu.mx, a.yliz@hotmail.com

Maestría en Mecatrónica. Universidad Politécnica de Pachuca Ex-Hacienda de Santa Bárbara, Municipio de Zempoala, Hidalgo, Carretera Pachuca Cd. Sahagún Km. 20, C.P. 43830 Tel. 01 (771) 5477510

Resumen

En el presente artículo se describen los aspectos importantes de la metodología de diseño, la fabricación y el modelado cinemático de un robot manipulador de tres grados de libertad. El manipulador robótico diseñado tendrá fines de investigación y será utilizado en el área de robótica, automatización y control de la Universidad Politécnica de Pachuca. Se presenta la propuesta de diseño de un robot manipulador de 5 barras similar al IRB1400 de ABB. Se utilizan encoders de cuadratura como sensores, como actuadores se utilizan motoreductores CD y como adquisición de datos una tarjeta arduino. Se calcula la cinemática directa e inversa del manipulador, mediante el uso de los parámetros de Denavit-Hartenberg. Se realizan pruebas de simulación del comportamiento del robot y la validación del modelo cinemático.

Palabras clave: Robótica, manipulador robótico, cinemática de manipuladores, Nigel Cross

1. Introducción

El presente trabajo describe los aspectos principales a la hora de diseñar, ya sea un prototipo, un producto nuevo o la mejora de algo existente. El enfoque organizado y ordenado para resolver problemas se conoce como proceso de diseño, el cual en ingeniería toma en cuenta las necesidades, los deseos y los problemas de la sociedad mediante la aplicación de principios científicos, experiencia y creatividad.

Los diferentes tipos de dibujos técnicos tienen una función específica en el proceso de diseño de ingeniería, es decir los bosquejos a mano alzada capturan y documentan el proceso de ideación. Mientras los modelos y dibujos CAD capturan el diseño y especifican los detalles necesarios para su fabricación. El proceso de diseño para cualquier producto requiere una comprensión clara de las funciones y el requerimiento esperado de ese producto. Se estima que entre 70 y 80% de los costos de desarrollo y fabricación de los productos se determina durante las fases de diseño inicial [2].

Al diseñar es necesario imaginar la forma en que va a funcionar el aparato o máquina. La idea principal es tener un robot manipulador con movimientos articulares, debido a que son los que se encuentran mayormente en las industrias. En [3] proponen un diseño de un robot manipulador de tres grados de libertad, mostrando los requerimientos del robot a diseñar, sus componentes empleados para el proceso de fabricación, selección de actuadores, sensores, y el tipo de transmisión de potencia,

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

adecuados para su correcto funcionamiento tomando en cuenta las características de los robots manipuladores comerciales. Mientras que en [7] proponen una arquitectura de un robot paralelo de 5 barras similar al robot presentado en este trabajo.

Para la creación de un nuevo producto existen varios modelos para el proceso de diseño, el modelo simple de 4 etapas y el modelo francés son un par de ejemplos [1]. Estos modelos dan paso a distintos métodos, uno de los métodos más utilizados es el creativo, en el que el diseñador recurre a su creatividad e imaginación, a analogías de sistemas o productos que no son afines, etc. Otro método es el racional, el cual se describe por Nigel Cross [1] y es el utilizado esta ocasión.

La metodología utilizada en este artículo se compone de 7 etapas, en las cuales se pretende ir de un problema general a sub-problemas, resolverlos mediante sub-soluciones y generar una solución general.

Las etapas son las siguientes:

- Clarificar objetivos.
- Establecer funciones.
- Configurar requerimientos.
- Determinar características.
- Generar alternativas.
- Evaluar alternativas.
- Diseño conceptual.

2. Metodología de Nigel Cross

2.1 Clarificar Objetivos

En esta etapa se parte del objetivo general que es **"Diseñar un robot manipulador de tres grados de libertad para fines de investigación"**. El robot a diseñar es del tipo manipulador robótico industrial similar al **IRB 1400 de ABB**, inicialmente será diseñado para que cumpla funciones de posicionamiento, a medida que avance la investigación se irá añadiendo la capacidad de carga, descarga, manipulación y traslado de objetos. A partir del conocimiento de las necesidades del usuario final, se divide este objetivo en sub-objetivos como se muestra en figura 1.

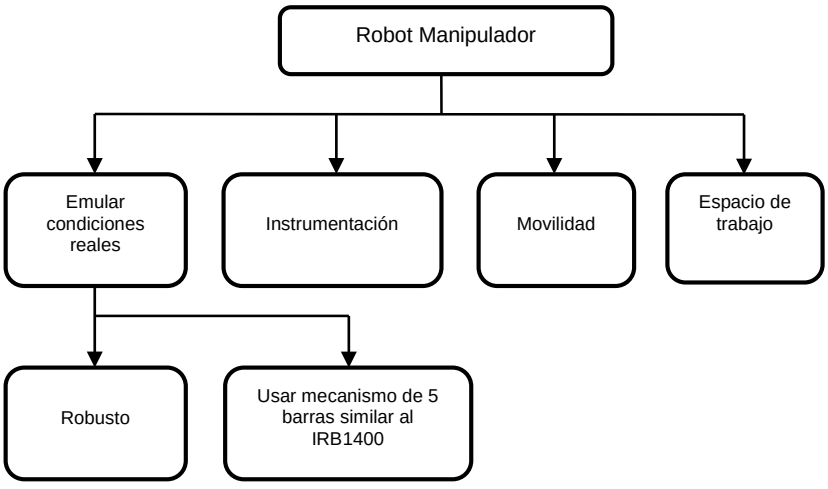


Figura 1. Árbol de objetivos.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Se puede observar cuatro sub-objetivos principales, la primera es emular condiciones reales de movimiento del robot, la segunda es tener evidencia del movimiento realizado por el mecanismo del robot mediante un sistema de instrumentación, la tercera es darle movilidad, que no requiera de una instalación propia y específica para su funcionamiento, por último, la cuarta necesidad es permitir que el efector-final del robot manipulador tenga un espacio de trabajo adecuado para realizar ejercicios de posicionamiento espacial.

2.2 Establecer Funciones

Para establecer las funciones utilizamos el método de análisis de funciones del cual se obtiene un modelo del sistema tipo caja transparente que se muestra en la figura 2, describiendo sus entradas, sub-funciones y salidas.

Esta descripción gráfica parte de las necesidades del producto y los resultados esperados y sirve para identificar el comportamiento del sistema mediante funciones específicas de una manera simplificada, entre más simple se defina el problema es más fácil obtener una solución.

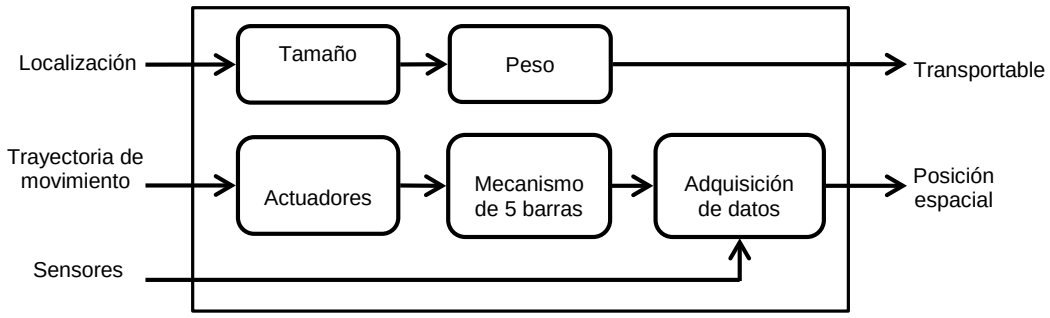


Figura 2. Modelo del sistema *(caja transparente).*

2.3 Configurar Requerimientos

En esta etapa se define qué se requiere del producto y qué desempeño se espera de él. En la tabla 1 se muestran los requerimientos.

Tabla 1. Requerimientos del producto

Estructura	
Tamaño	Menor a 1 mts.
Peso	Menor a 15 Kg.
Material	Aluminio, Nylamid, Nylacero
Movimiento	Fijo en operación – Móvil para transporte
Sistema Electrónico	
Interfaz	Gráfica e Intuitiva
Paro de Emergencia	Físico y en la interfaz
Alimentación	Eléctrica (120 Vca, 12Vcd)
Sensores	Posición, Límite

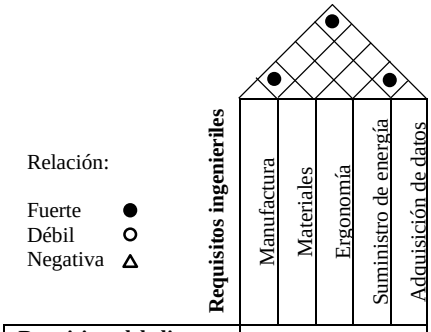
2.4 Determinar Características

Para determinar las características del producto se recurre al método del despliegue de la función de calidad. Primero se identifica qué requiere el cliente y se compara con los requerimientos de

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

ingeniería que implican. Estos requerimientos se colocan en una tabla comparativa donde se pueda observar la relación del requerimiento con el proceso de ingeniería como se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Despliegue de la función de calidad.



Requisitos del cliente					
Fácil de mover	○	●	●		
Funcional		●			
Robusto	●	●			
Interfaz sencilla				○	●
Atractivo	●				
Libre de mantenimiento	○	○			△
Seguro			○	●	●

Con esto se determina que el producto debe tener las siguientes funciones:

- Fijación y movilidad. El producto debe poder fijarse en una mesa de trabajo para evitar vibraciones y movimientos indeseados, y debe también tener la movilidad para poder almacenar el robot cuando no se utilice o poder cambiarlo de mesa de trabajo según se requiera.

- Interfaz gráfica. Se requiere una interfaz amigable para que el operador pueda visualizar los movimientos, y estados de cada una de las articulaciones del robot.

- Estructura robusta. Se requiere de una estructura que no tenga deformaciones y soporte de trabajo continuo.

- Sensores. Son necesarios para activar o desactivar el robot, y obtener las mediciones de cada una de las articulaciones del robot.

2.5 Generar Alternativas

Para generar múltiples alternativas posibles del producto se crea una gráfica en la que se proponen alternativas para cada función o característica que integra al producto final. En la tabla 1 se muestran las diferentes soluciones para las sub-funciones. Una solución se puede formar también a partir de la combinación de dos soluciones propuestas.

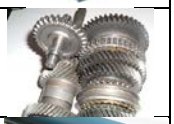
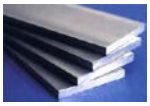
Para la primera sub-función que son los motores, existen cuatro propuestas para seleccionar el tipo de actuador que tendrán las articulaciones rotacionales, la primera es el motor sin escobillas **(brushless)** de corriente directa, de poco peso y apropiado para prototipos, el segundo un motor a pasos, con alto torque, el tercero motor de corriente continua de imán permanente, el cuarto un motor de CA de jaula de ardilla.

Para la transmisión de potencia, el movimiento a realizar por las articulaciones es del tipo de transmisión rotacional-rotacional, para este tipo de transmisión existen cuatro soluciones, la primera es por banda síncrona, que nos permite transmitir potencia a una relación constante de velocidad angular, la segunda es por banda de tipo V que se pueden emplear para distancias grandes entre centros, la tercera es por cadena y catrina, este tipo de transmisión no tiene problemas de deslizamiento ni de

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

arrastre, la cuarta solución es un sistema de engranaje que nos permitirá ampliar la capacidad limitada del par en el motor y reducir la velocidad rotacional del mismo.

Tabla 3. Gráfica morfológica.

Solución / Sub-funciones	1	2	3	4
Motores				
Transmisión de potencia				
Estructura				
Rodamientos				
Sensores				
Movilidad				
Interfaz				

En la estructura mecánica del robot se tienen cuatro propuestas de solución, la primera es muy común utilizar placa de aluminio 6061 que tiene excelente resistencia a la corrosión, buena maquinabilidad, y se suelda satisfactoriamente, la segunda opción es barra de aluminio, la tercera opción cold rolled, que cuenta con excelentes propiedades mecánicas tales como dureza del material y su resistencia a la tensión, por último la cuarta opción es tubular de nylamid M, que resulta de dos a ocho veces más ligero que los metales, tiene resistencia al impacto y resistencia dieléctrica.

En los rodamientos se tiene cuatro propuestas de solución para las articulaciones del robot, la primera es utilizar rótulas de esfera hueca, la segunda es un rodamiento de bolas de carga axial, la tercera opción un rodamiento cónico para soportar ambas cargas, (axial y radial), y por último la cuarta alternativa es un rodamientos de bolas de carga radial.

Los sensores de entrada se tienen tres propuestas para medir la posición articular de cada uno de las articulaciones del motor, la primera es un resolver, la segunda es un encoder óptico, y por último la tercera opción es un potenciómetro.

Para la movilidad y fijación se tienen igualmente tres alternativas distintas, la primera es ser movido por una o dos personas, la segunda es un montacargas de motor y el tercero un montacargas manual que puede ser llevado por una o dos personas.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Finalmente está la interfaz, la primera opción es utilizar el lenguaje de programación LabVIEW® para crear la interfaz gráfica y una tarjeta de adquisición de la marca National Instruments® para la instrumentación. La segunda opción es realizar una interfaz en Java® y utilizar una tarjeta electrónica arduino® para realizar la operación del mecanismo y la adquisición de datos. Por último la tercera opción, la interfaz sería programada en Matlab® y utilizar una tarjeta electrónica arduino®.

2.6 Evaluar Alternativas

Para evaluar las alternativas, Nigel Cross propone crear una tabla comparativa [18], jerarquizar las funciones y asignarles una ponderación, En lugar de eso, en este paso, basándose en la información recopilada anteriormente, se evalúan las soluciones posibles para obtener una solución general, y un diseño final. Esta evaluación se hace a criterio del diseñador, considerando cada una de las cualidades que posee cada alternativa de solución.

En las siguientes tablas se muestran las evaluaciones para cada sub-función, del lado izquierdo están los puntos a evaluar, en la primer columna se cuantifica la ponderación de importancia de cada punto a evaluar, y en las siguientes columnas se encuentra la evaluación de cada solución propuesta, para obtener la suma de puntos se multiplica el valor de cada punto por su ponderación de importancia y se suman verticalmente. Esta es una forma de dar un valor cuantitativo a cada alternativa considerando las cualidades de cada una.

En la tabla 4 se muestra la evaluación de la sub-función “Motores” de la cual se selecciona la solución uno correspondiente a motor de corriente directa (CD).

Tabla 4. Evaluación de alternativas: sub-función “Motores”

Aspectos a evaluar	*Ponderación*	*Solución 1*	*Solución 2*	*Solución 3*	*Solución 4*
Consumo de energía	0.7	8	7	7	6
Dimensiones	0.6	9	6	6	5
Manipulación	0.8	9	8	8	7
Costo	1	8	7	7	7
Total		26.2	21,9	21,9	19.8

En la tabla 5 se muestra la evaluación de la sub-función “Transmisión de potencia” de la cual se selecciona la cuarta solución que es un tren de engranes de reducción.

Tabla 5. Evaluación de alternativas: sub-función “Transmisión de potencia”

Aspectos a evaluar	*Ponderación*	*Solución 1*	*Solución 2*	*Solución 3*	*Solución 4*
Dimensiones	0.7	6	6	6	8
Mantenimiento	0.8	6	6	5	9
Ruido	0.9	6	6	4	9
Costo	0.6	5	5	5	7
Total		17.4	17.4	14.8	25.1

En la tabla 6 se muestra la evaluación de la sub-función “Estructura” de la cual se hace una fusión de la solución uno y dos para la construcción de la base, mientras que la solución 3 se utilizó para el diseño de los ejes y la solución cuatro, nylamid, se empleó para la fabricación del resto robot ya que cumple con los requerimientos apropiados de poco peso.

En la tabla 7 se muestra la evaluación de la sub-función “Rodamientos” de la cual se hace una fusión de la solución uno, dos y cuatro; debido a su utilidad en cada uno de los grados de libertad del robot manipulador, los cuales son: cintura, hombro y codo.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Tabla 6. Evaluación de alternativas: sub-función "Estructura"

Aspectos a evaluar	*Ponderación*	*Solución 1*	*Solución 2*	*Solución 3*	*Solución 4*
Maquinado	0.9	7	7	7	9
Peso	1	8	8	6	9
Materiales	0.8	8	8	7	8
Costo	0.7	5	5	7	8
Total		24.2	24.2	22.8	29.1

Tabla 7. Evaluación de alternativas: sub-función "Rodamientos"

Aspectos a evaluar	*Ponderación*	*Solución 1*	*Solución 2*	*Solución 3*	*Solución 4*
Dimensiones	0.5	8	8	6	8
Duración	1	8	8	8	8
Reemplazo	0.9	7	9	5	7
Costos	0.8	7	9	5	7
Total		23.9	27.3	19.5	23.9

En la tabla 8 se muestra la evaluación de la sub-función "Sensores" de la cual se selecciona la solución 2, siendo ésta el encoder óptico para medir la posición articular ya que viene integrado con los motores CD seleccionados previamente en la tabla 4

Tabla 8. Evaluación de alternativas: sub-función "Sensores"

Aspectos a evaluar	*Ponderación*	*Solución 1*	*Solución 2*	*Solución 3*
Rango dinámico	0.6	9	8	5
Resolución	0.9	9	9	5
Estabilidad térmica	0.8	9	9	5
Costo	0.7	3	9	10
Total		22.8	26.4	18.5

En la tabla 9 se muestra la evaluación de la sub-función "Movilidad" de la cual se decide la solución 1, ya que es posible transportar el robot por una o dos personas sin problemas.

Tabla 9. Evaluación de alternativas: sub-función "Movilidad"

Aspectos a evaluar	*Ponderación*	*Solución 1*	*Solución 2*	*Solución 3*
Inversión de tiempo	0.8	8	6	6
Practicidad	0.6	8	5	7
Costo	0.8	10	5	7
Total		19.2	11.8	14.6

En la tabla 10 se muestra la evaluación de la sub-función "Interfaz" de la cual se selecciona la tercera solución, por lo tanto se tendrá una interfaz elaborada en Matlab® con una tarjeta arduino utilizada como tarjeta de adquisición de datos, debido a que tiene las características suficientes para el propósito requerido.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Tabla 10. Evaluación de alternativas: sub-función "Interfaz"

Aspectos a evaluar	*Ponderación*	*Solución 1*	*Solución 2*	*Solución 3*
Manufactura	0.5	7	7	9
Cantidad de material	0.5	8	6	8
Practicidad de uso	0.8	8	4	6
Costo	0.6	6	9	8
Total		17.5	15.1	18.1

Se obtiene un prototipo final del robot manipulador, ver figura 3. El diseño del producto que se muestra en la figura 4, en color verde (Placa Nylamid) y en color carmín (Placa de Aluminio 6061) se muestra la base de todo el robot (Cintura), los eslabones del robot (Nylamid tubular), se muestran en color amarillo y azul que son correspondientes al hombro, ante-brazo y brazo como se observa en la figura anterior. Toda la estructura del robot manipulador tendrá un peso de 9.75 kg.

Figura 3. Prototipo del robot manipulador.

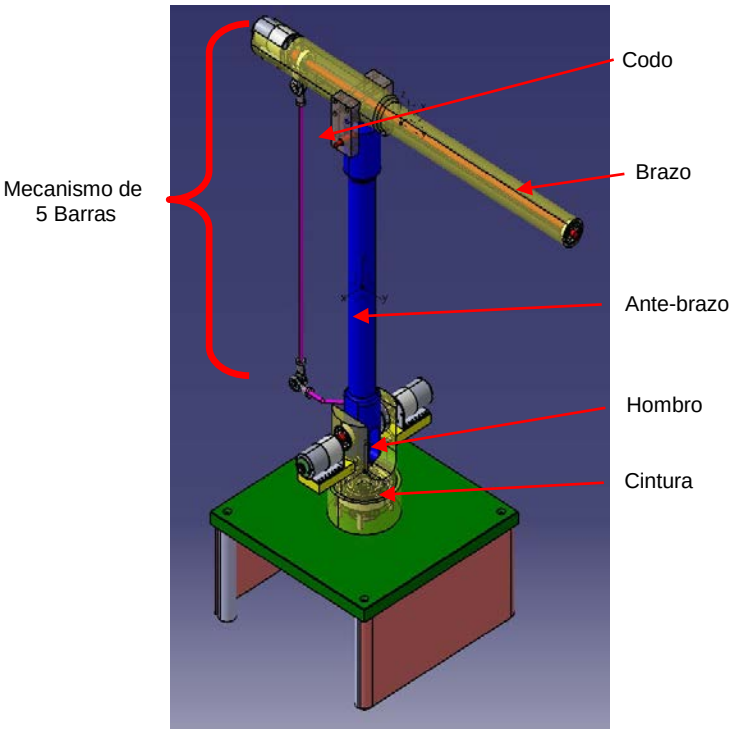


Figura 4. Diseño conceptual.

El proceso de operación e instrumentación realizado se basa en una interfaz programada en Matlab®, trabaja según la configuración del operador, recibe la señal de los sensores y activa los actuadores, toma las mediciones y las almacena para su análisis. Este proceso se muestra en la gráfica mostrada en la figura 5.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

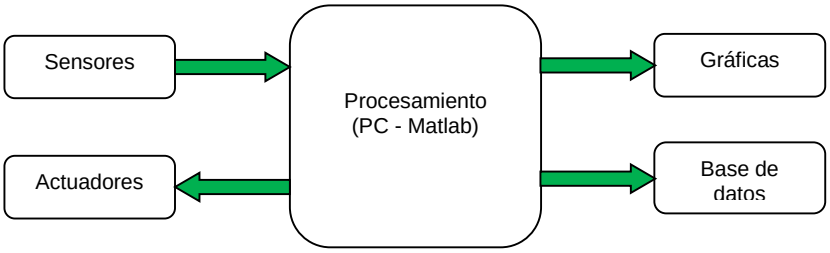


Figura 5. Diagrama de flujo: Instrumentación.

3. Modelo Cinemático

El estudio de la cinemática directa de robots manipuladores industriales proporciona elementos para analizar y diseñar el desplazamiento de trayectorias del robot, así como la orientación del efector-final (herramienta) de trabajo [5].

La posición y orientación del efector-final del robot no se mide directamente, sino que en su lugar se calculan utilizando las lecturas de posición articular de la cinemática del robot. La cinemática inversa se utiliza para obtener las posiciones articulares necesarias que debe adoptar el robot para alcanzar la posición y la orientación del efector-final deseada [4].

En la figura 6 se muestra la estructura antropomórfica del robot de tres grados de libertad del cual se obtiene el modelo cinemático del robot. Denavit-Hartenberg crearon un algoritmo que permite la obtención del modelo cinemático directo, el cual es un método matricial sistemático que permite establecer sistemas de coordenadas ligados a cada eslabón de un mecanismo, para así determinar la cinemática completa del mismo [6].

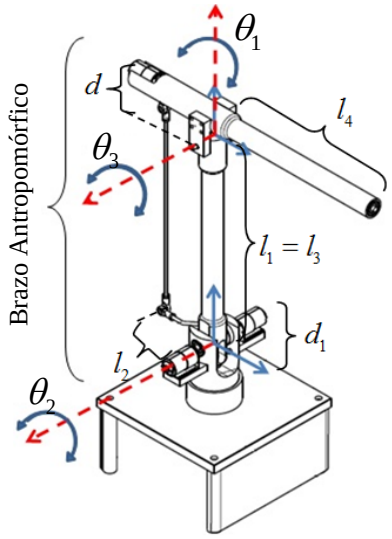


Figura 6. Estructura antropomórfica del robot "Clony", conjunto de tres articulaciones de revolución con la primera articulación ortogonal a las otras dos que son paralelas.

Los parámetros de Denavit-Hartenberg y los límites de rango de cada una de las articulaciones se muestran en las tablas 11 y 12. Los marcos representados y parámetros asociados fueron encontrados usando la convención de Craig [4].

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Tabla 11. Parámetros Denavit-Hartenberg del manipulador diseñado

Eslabón	$\theta_i(^o)$	$\alpha_{i-1}(^o)$	$a_{i-1}(mm)$	$d_i(mm)$
1	$\theta_1(0^o)$	0^o	0	d_1
2	$\theta_2(-90^o)$	-90^o	0	0
3	$\theta_3(0^o)$	0^o	l_1	0
4	$\theta_4(0^o)$	-90^o	d	l_4

Tabla 12. Espacio de trabajo del robot manipulador

Eslabón	***Espacio de trabajo (º)***
1	$+130^o \ a \ -130^o$
2	$+50^o \ a \ -50^o$
3	$+90^o \ a \ -30^o$

3.1 Cinemática directa de posición

La cinemática directa de posición se obtiene del centro de masa de cada uno de los eslabones usando la definición de matriz de transformación mostrada en (1).

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} c_i & -s_i & 0 & a_{i-1} \\ s_i c\alpha_{i-1} & c_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} d_i \\ s_i s\alpha_{i-1} & c_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$P_2 = P_1 \quad (3)$$

$$P_3 = \begin{bmatrix} l_1 c_1 c_2 \\ l_1 s_1 c_2 \\ d_1 - l_1 s_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$P_4 = \begin{bmatrix} d c_1 c_{23} - l_4 c_1 s_{23} + l_1 c_1 c_2 \\ d s_1 c_{23} - l_4 s_1 s_{23} + l_1 s_1 c_2 \\ d_1 - d s_{23} - l_4 c_{23} - l_1 s_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

En robótica para simplificar se usa la notación $c_i = \cos(\theta_i)$, $s_i = \sin(\theta_i)$, $c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$ y $s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$ donde $i = 1,2,...,n$ y θ_i, θ_j, representan el número y las variables articulares del robot.

3.2 Cinemática directa de Velocidad

La cinemática directa de velocidad está definida por:

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

$$V = \frac{dp_i(q)}{dt} = \frac{\partial p_i(q)}{\partial q}\frac{dq}{dt} = Jp_i(q)\dot{q} \tag{6}$$

Donde Jp_i es el Jacobiano respecto de cada una de las posiciones articulaciones del robot, $q \in \Re^n$ es el vector de posiciones articulares, $\dot{q} \in \Re^n$ es el vector de velocidades articulares.

El Jacobiano de cualquier estructura de un robot manipulador es una matriz que relaciona las velocidades de movimiento de las articulaciones y las del efector-final del robot y pueden ser calculadas por (6):

Para V_1 tenemos:

$$V_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \tag{7}$$

Para V_2 tenemos:

$$V_2 = V_1 \tag{8}$$

Para V_3 tenemos:

$$V_3 = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 c_2 & -l_1 c_1 s_2 & 0 \\ l_1 c_1 c_2 & -l_1 s_1 s_2 & 0 \\ 0 & -l_1 c_2 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \tag{9}$$

Para V_4 tenemos:

$$V_4 = \begin{bmatrix} Jp_{4(11)} & Jp_{4(12)} & Jp_{4(13)} \\ Jp_{4(21)} & Jp_{4(22)} & Jp_{4(23)} \\ Jp_{4(31)} & Jp_{4(32)} & Jp_{4(33)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \tag{10}$$

Con:

$$Jp_{4(11)} = -ds_1c_{23} + l_4s_1s_{23} - l_1s_1c_2$$
$$Jp_{4(12)} = -dc_1s_{23} - l_4c_1c_{23} - l_1c_1s_2$$
$$Jp_{4(13)} = -dc_1s_{23} - l_4c_1c_{23}$$
$$Jp_{4(21)} = l_1c_2c_1 - l_4c_1s_{23} + dc_1s_{23}$$
$$Jp_{4(22)} = -l_1s_2s_1 - l_4s_1c_{23} - ds_1s_{23}$$
$$Jp_{4(23)} = -l_4s_1c_{23} - ds_1s_{23}$$
$$Jp_{4(31)} = 0$$
$$Jp_{4(32)} = -dc_{23} + l_4s_{23} - l_1c_2$$
$$Jp_{4(33)} = -dc_{23} + l_4s_{23}$$

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Después de haber obtenido la cinemática directa del robot, ahora es posible obtener la posición del efector-final desde cada uno de los ángulos de las articulaciones q_1, q_2 y q_3.

3.3 Cinemática inversa de posición

La cinemática inversa trata el problema de encontrar los ángulos de las articulaciones requeridas para producir una cierta posición deseada y la orientación del efector-final. Encontrar la solución de la cinemática inversa para un manipulador puede ser una tarea muy difícil. Generalmente son ecuaciones no lineales. Sin embargo, los casos especiales tienen una solución de forma cerrada y se pueden resolver.

El desarrollo de la cinemática inversa para el robot "Clony" se utiliza el método geométrico para encontrar la solución de la posiciones articulares θ_1, θ_2 y θ_3. Teniendo en cuenta la figura 7 es fácil ver que la solución para θ_1 es:

$$\theta_1 = A\tan 2(p_{wy}, p_{wx}) \tag{11}$$

Una vez obtenida θ_1 el problema de la cinemática inversa se reduce a una estructura planar como se muestra en la figura 8, y es posible escribir:

$$p_{wx1} = \sqrt{p_{wx}^2 + p_{wy}^2} \tag{12}$$

$$p_{wz1} = p_{wz} - d_1 \tag{13}$$

$$p_{wy1'} = p_{wy1} \tag{14}$$

$$p_{wz1'} = p_{wz1} \tag{15}$$

y

$$p_{wx1'} = -l_1 s_2 + l_4 c_{23'} \tag{16}$$

$$p_{wz1'} = l_1 c_2 + l_4 s_{23'} \tag{17}$$

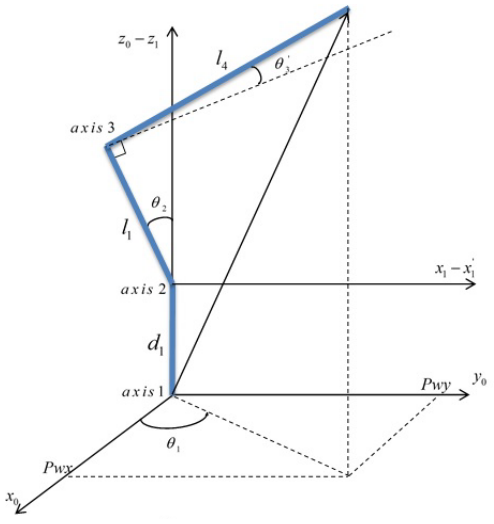


Figura 7. Estructura antropomórfica del robot (3D)

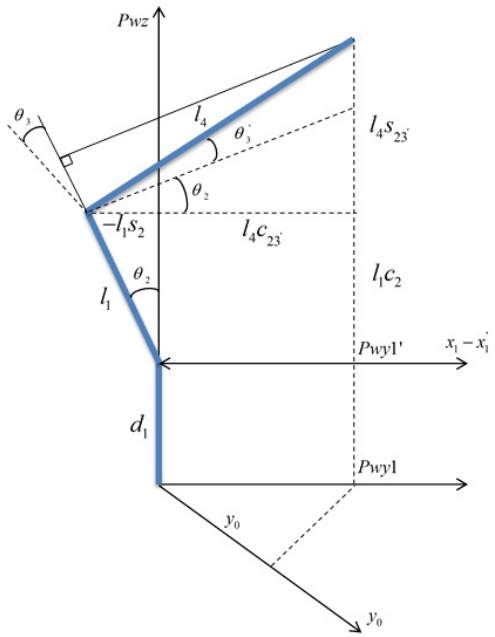


Figura 8. Estructura antropomórfica del robot (Planar)

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Elevando al cuadrado y sumando las ecuaciones (16) y (17) el resultado es

$$p_{wx1'}^2 + p_{wz1'}^2 = l_4^2 + l_1^2 + 2l_1 l_4 s_{3'} \tag{18}$$

lo que da

$$s_{3'} = \frac{p_{wx1'}^2 + p_{wz1'}^2 - l_4^2 - l_1^2}{2l_1 l_4} \tag{19}$$

Estableciendo $c_3 = \pm\sqrt{1 - s_{3'}^2}$ la solución para $\theta_3^{'}$ será

$$\theta_3^{'} = -A\tan 2(s_{3'}, c_{3'}) \tag{20}$$

$$\theta_3 = \theta_3^{'} + A\tan\left(\frac{d}{l_4}\right) \tag{21}$$

usando $\theta_3^{'}$ en (16) y (17) resulta un sistema de 2 ecuaciones con 2 incógnitas s_2 y c_2 :

$$\begin{aligned} p_{wx1'} &= -l_1 s_2 + l_4(c_2 c_{3'} - s_2 s_{3'}) \\ p_{wz1'} &= l_1 c_2 + l_4(s_2 c_{3'} - c_2 s_{3'}) \end{aligned} \tag{22}$$

Resolviendo para s_2 y c_2 da

$$s_2 = \frac{-p_{wx1'}(l_1 + l_4 s_{3'} + p_{wz1'})}{l_1^2 + l_4^2 c_{3'}^2 + 2l_1 l_4 s_{3'} + l_4^2 s_{3'}^2} \tag{23}$$

$$c_2 = \frac{p_{wx1'}(l_4 c_{3'}) + p_{wz1'}(l_1 + l_4 s_{3'})}{l_1^2 + l_4^2 c_{3'}^2 + 2l_1 l_4 s_{3'} + l_4^2 s_{3'}^2} \tag{24}$$

La solución para θ_2 será

$$\theta_2 = -A\tan\left(\frac{s_2}{c_2}\right) \tag{25}$$

4. Resultados

Los resultados experimentales presentados son del robot manipulador de tres grados de libertad, ver figura 3. La validación del modelo cinemático se realizó sin aplicar una señal de entrada permitiendo el libre movimiento del robot manualmente, teniendo una captura de los datos de cada una de las articulaciones del robot.

Los datos reales se comparan con el modelo cinemático inverso de posición utilizando los modelos de posición (11), (21) y (25) mostrados en la sección 3. El diagrama de bloques para validar el modelo cinemático se muestra en la figura 9. Los parámetros físicos del robot manipulador se muestran en la tabla 13.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

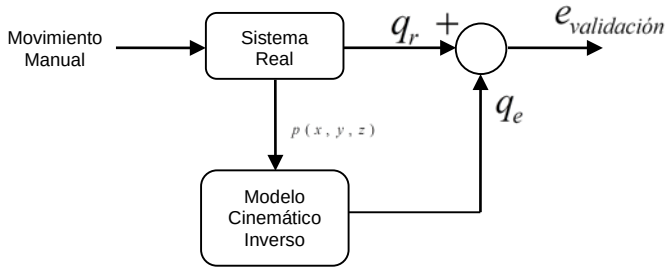


Figura 9. Diagrama a bloques para validación de modelo cinemático.

Tabla 13. Parámetros del robot.

Eslabón	Longitud [m]	Longitud (c.g) [m]
1	$d_1 = 0.1325$	$d_{c1} = 0.0448$
2	$l_1 = 0.4500$	$l_{c1} = 0.2250$
3	$l_4 = 0.4110$	$l_{c4} = 0.3283$

Donde $p(x, y, z)$ es la posición del efector-final del sistema real, $q_r \in \Re^3$ es la posición real del robot, $q_e \in \Re^3$ es la posición estimada del modelo cinemático inverso, $e_{validación} \in \Re^3$ es el error de validación definido por:

$$e_{validación} = q_r - q_e \tag{26}$$

En la figura 10 el resultado de la validación del modelo cinemático inverso y en la figura 11 se muestra el error de validación de cada una de las articulaciones de manipulador.

El resultado de la validación del modelo cinemático inverso (ver figura 10), se muestra cada una de las posiciones articulares generadas durante la prueba de movimiento manual del robot, en donde las líneas en color azul representan las posiciones articulares reales del movimiento del robot, mientras las líneas en color rojo representan las posiciones articulares estimadas del modelo cinemático inverso obtenidos en (11), (21) y (25).

La prueba de movimiento del robot de tres grados de libertad se hizo dentro del espacio de trabajo mostrado anteriormente en la tabla 12, para la articulación θ_1 se movió en un intervalo de $(1.763\,\text{rad}, -1.157\,\text{rad})$ equivalente a $(101.01^o, -66.29^o)$, para la articulación θ_2 se movió en un intervalo de $(-1.851\,\text{rad}, -1.276\,\text{rad})$ equivalente a $(-106.05^o, -73.10^o)$, por último la articulación θ_3 se movió en un intervalo de $(0\,\text{rad}, 0.511\,\text{rad})$ equivalente a $(0^o, 29.31^o)$.

Los errores generados por cada articulación se mostraron en la figura 11, en donde se obtuvo un error de $0\,\text{rad}$, equivalente a (0º) aproximadamente para la articulación θ_1, el error de estimación de θ_2 se obtuvo un máximo error de $0.006637\,\text{rad}$, equivalente a (0.380^o) y un mínimo de $0.003669\,\text{rad}$, equivalente a (0.210^o) y para la articulación θ_3 se obtuvo un máximo error de $-0.006345\,\text{rad}$, equivalente a (-0.363^o) y un mínimo error de $-0.005892\,\text{rad}$, equivalente a (-0.337^o).

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

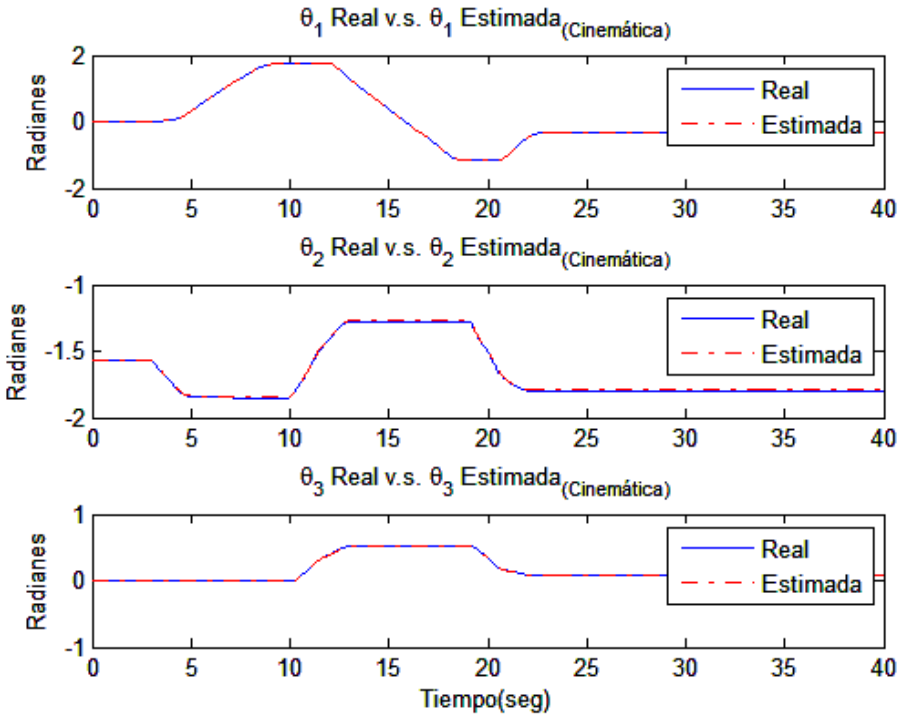


Figura 10. Validación de modelo cinemático.

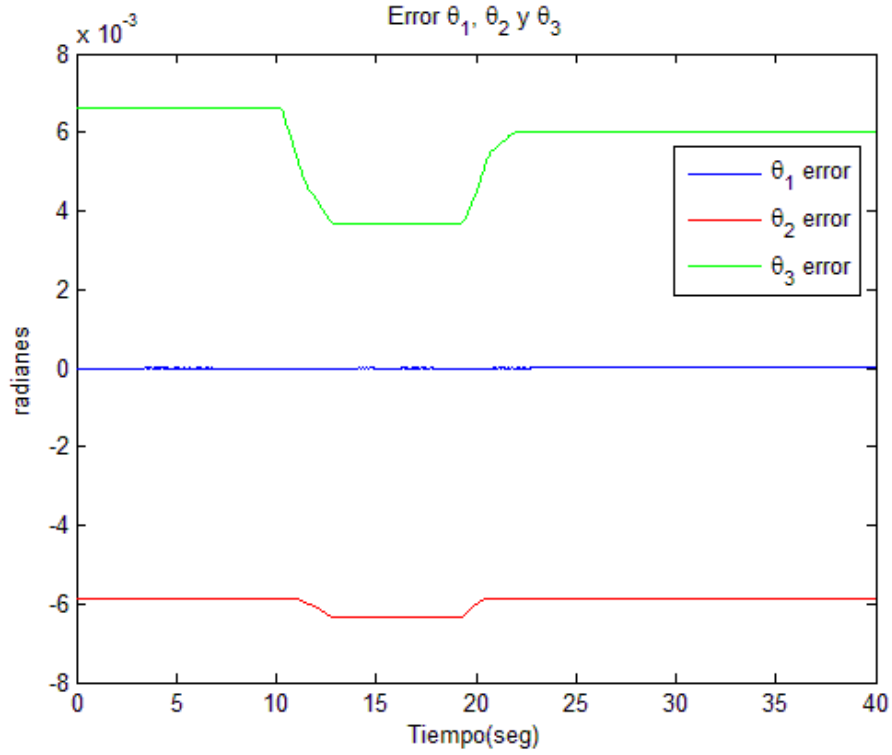


Figura 11. Error de validación.

5. Conclusiones

Se diseñó y construyó un prototipo de robot manipulador de 5 barras y tres grados de libertad similar al robot industrial IRB 1400 de ABB con fines de investigación, mediante el uso de la metodología de Nigel Cross, la cual es una forma simple y racional para lograr un buen producto. El prototipo puede ser utilizado para realizar prácticas de programación de robots, análisis estructural y de mecanismos.

Los materiales de bajo costo como el nylamid, nylacero y aluminio presentan buenas propiedades mecánicas para el desarrollo de prototipos como el robot manipulador.

El modelo cinemático obtenido del robot manipulador propuesto es apropiado para realizar simulaciones reales del robot, ya que el error de validación es aproximado a cero. También puede ser utilizado para la investigación para probar algoritmos de control de posición y de seguimiento de trayectorias. Los trabajos futuros a realizar son obtener el modelo matemático que incluya toda la dinámica del robot, el control de posición y el control de seguimiento de trayectorias.

Referencias

[1] Cross N., *"Engineering design methods: strategies for product design",* John Wiley & Sons, LTD. England, 3º Ed., 2000.
[2] Giesecke F., Hill I., Spencer H., Mitchell A., Dygdon J., Novak J., y Lockhart S., *"Dibujo técnico con graficas de ingeniería",* PEARSON, México, 14 Ed., 2013.
[3] Adueza L., Aguirre I., *"Diseño de un manipulador robótico con tres grados de libertad para fines educativos"*, *Revista Ciencia e Ingeniería*. ISSN 1316-7081, Vol. 30, No. 1, pp. 3-14, diciembre-marzo, 2009.
[4] Craig J., *"Introduction to Robotics, Mechanics and Control",* Addison-Wesley, USA, 2nd Ed., 1989.
[5] Reyes F., *"Robótica. Control de robots manipuladores",* Alfaomega, México, 1º Ed., 2011.
[6] Barrientos A., Peñín L., Balaguer C. y Aracil R., *"Fundamentos de robótica",* McGraw Hill, Madrid España, 2007.
[7] Urbalejo A., Jacobo J., Jiménez Eusebio., Quintero J. A., López J. R., Castro J. C., *"Simulación, Control y Construcción de un Robot Paralelo de 5 Barras y 6 GDL para Propósitos Didácticos",* 10º Congreso Nacional de Mecatrónica. pp. 220-225 Noviembre 3 y 4, 2011.

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

14. Teleoperación con dispositivos hápticos

Jorge Gudiño Lau[1], Palafox Rodríguez Joel[2], Santiago Hernández Eugenio[3], Felipe Ríos Cortez[1], y Saida Charre Ibarra[1]

jglau@ucol.mx;

Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Electromecánica ([1]).
Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas ([2]).
Instituto Tecnológico Superior de Huauchinango, Puebla ([3]).

Resumen

Este trabajo presenta una plataforma experimental de teleoperación conformado por dos dispositivos hápticos y son manipulados experimentalmente por dos algoritmos de control PD y PD más compensador de gravedad, el último controlador permite mejorar el desempeño del operador humano en sistema robótico teleoperado, además se muestra los resultados experimentales lo que garantiza que el control funciona correctamente a pesar de tener el inconveniente del tiempo de retardo, en este mismo sentido se describe en forma detallada la comunicación entre las dos PC para realizar la teleoperación, la comunicación se realizó por medio de una red LAN, empleando el software Matlab.

Palabras clave: Háptica, teleoperación, control, robots, Phantom Omni.

1. Introducción

En los últimos años, los investigadores del área de Mecatrónica han realizado sus estudios en caminados a manipular y controlar a distancia a robots, es decir en un sitio se encuentra el operador humanos con una manipulador o dispositivo háptico que le llamamos “maestro” y en otro lugar remoto se encuentra un robot manipulador o dispositivo háptico denominado “esclavo”.

Mediante la investigación y recuperación de información de los trabajos que han realizado diversos investigadores dentro del área háptica y teleoperación, siendo estos la base fundamental para llevar a cabo distintos experimentos. Una herramienta de vital importancia es el internet ya que no se cuentan con libros que hagan referencia a este tema, haciendo una selección más objetiva y así, contar con la información necesaria para poder realizar la teleoperación mediante la conexión de una red LAN entre dos computadoras y los dispositivos hápticos.

Un sistema de teleoperación está constituido por los siguientes elementos:

- ✓ Interfaz háptica, el termino háptico (del griego **haptesthai**, que significa “tocar”) es el adjetivo usado para describir algo relacionado con o basado en el sentido del tacto. La información háptica contiene tanto información propioceptiva (información kinestésica), táctil como vestibular, todas necesarias en ciertos casos. La percepción háptica se basa en señales sensoriales que surgen de la interacción háptica con entornos reales o virtuales[1]. La interfaz háptica es empleada como un dispositivo de medida kinemática y provee información táctil al operador. Las interfaces hápticas, permiten al operador

mantener la sensación con el entorno remoto [2]. El sistema háptico es el proceso de la aplicación de fuerzas a un ser humano "observador", dando la sensación de tocar e interactuar con objetos físicos reales. Se considera que un sistema háptico cuenta con tres componentes principales. El primero es la interfaz táctil o dispositivo háptico capaz de ejercer fuerzas controlables en el usuario con uno o más grados de libertad. Estas fuerzas se crean mediante tensores que permiten o impiden el movimiento de los brazos robots, según las indicaciones del software [1].

- ✓ Dispositivo háptico, es un mecanismo de eslabones articulados cuyos fines no son los mismos que los de un robot manipulador, sin embargo, la estrategia de modelado matemático es la misma. El modelado cinemático del dispositivo háptico corresponde al conjunto de ecuaciones que relacionan posición, velocidad y aceleración de las variables articulares con las coordenadas operacionales o variables de posición, velocidad y orientación representadas en el espacio cartesiano. El modelo dinámico del dispositivo háptico está constituido por las ecuaciones de movimiento que relacionan fuerzas debidas a efectos inerciales, Coriolis, centrípetas, gravitatorias y de fricción, los cuales no se trabajaran en este artículo. [2]

- ✓ Maestro, operador o teleoperador, es la persona que genera las trayectorias suaves y siente la retroalimentación ya sea visual o táctil, o puede ser ambas, para ello el operador necesita de un dispositivo háptico capaz de enviar las señales al robot remoto y poderlo manipular a distancia.

- ✓ Esclavo o teleoperado, es un robot manipulador, un dispositivo háptico, un robot móvil o un dispositivo que pueda ser manipulado local o a distancia, es la que recibe las señales del maestro y las ejecuta.

- ✓ Controlador, el control juega un papel muy importante ya que este tiene como objetivo garantizar que el dispositivo esclavo llegue a la posición deseada dada por el maestro y además aporta a la disminuir los efectos de retardo de la comunicación.

Por lo que, la teleoperación es un medio para operar un robot utilizando la inteligencia humana, que requiere la disponibilidad de interfaz hombre-máquina adecuada. El sistema de teleoperación por lo general consiste de dos robot manipuladores que están conectados de tal manera que se permite que el operador humano manipule uno directamente, que se llama maestro, al generar señales que se asignan a la distancia al manipulador, al cual se le llama esclavo. [3]

De acuerdo con su grado de autonomía, los robots pueden clasificarse en: teleoperados de funcionamiento repetitivo, y, autónomos o inteligentes. Se entiende por teleoperación el caso en el que un operador humano, remotamente ubicado respecto al robot, lo manipula. Esta teleoperación resulta incompatible con una autonomía robótica, entendida como el caso en que el control y toma de decisiones se realizan por el robot mismo. [4]

Es por ello que en los robots teleoperados, las tareas de percepción del entorno, planificación y manipulación compleja son realizadas por humanos, es decir, el operador actúa en tiempo real cerrando el bucle de control de alto nivel. Los sistemas evolucionados suministran al operador realimentación sensorial del entorno (imágenes, fuerza, distancia). En manipulación se usan brazos y manos antropomórficos con controladores automáticos que reproducen los movimientos del operador. Existen también otros controles donde el operador mueve una réplica a escala del manipulador, reproduciéndose los movimientos en éste, conocido este último como control háptico.

Los robots móviles teleoperados son ampliamente utilizados para llevar a cabo tareas complejas en ambientes peligrosos: algunos ejemplos conocidos son por ejemplo la inspección de estructuras subacuáticas, limpieza de plantas nucleares, o la remoción de minas. [5]

En este tipo de equipos, los operadores frecuentemente dependen solamente de la información visual acerca del entorno y en la mayoría de los casos no es suficiente para realizar tareas complejas debido al limitado campo visual de las cámaras. Por lo tanto, aparte de la posibilidad de error y fallo en la tarea, la teleoperación remota resulta una actividad agotadora y requiere un entrenamiento específico para el operador humano.

Las limitaciones de estos sistemas radican en la capacidad de procesamiento de las señales y con ello precisión, y coordinación hombre-robot. Es importante mencionar que el retraso de transmisión de información juega un papel importante y debe tomarse en cuenta en el diseño del sistema de control. El diseño de la interfaz hombre-máquina suele ser crítico. Por lo cual normalmente rehace en el operador las tareas de toma de decisiones con base a la información sensorial, experiencia y habilidad. [6]

El controlador empleado es un PD (Proporcional-Derivativo), es un controlador de malla cerrada con retroalimentación de posición y velocidad, es muy estudiado en la literatura de control de robots manipuladores, además incrementa la estabilidad del sistema mejorando su respuesta, reduce el sobre impulso y el tiempo de estabilización. En este artículo se presentan dos controladores más utilizados PD y el PD con compensador de gravedad, con resultados experimentales en la teleoperación de dos dispositivos hápticos. Los dos controladores se emplean para el control de posición angular y el seguimiento de trayectorias, el objetivo consiste que la trayectoria que describa el manipulador maestro, lo siga el manipulador esclavo.

La ecuación del controlador clásico PD es:

$$\tau = -K_p\tilde{q} - K_d\dot{\tilde{q}}$$

donde $K_p, K_d \in \mathbb{R}^{n\times n}$ son matrices simétricas definidas positivas y K_p es conocida como ganancia de posición y K_d como ganancia de velocidad, $\tilde{q} = q - q_d \in \mathbb{R}^n$ el vector de error de posición angular y $\dot{\tilde{q}} = \dot{q} - \dot{q}_d \in \mathbb{R}^n$ el vector de error de velocidad angular. El diagrama de bloques del controlador PD es mostrado en la figura 1.

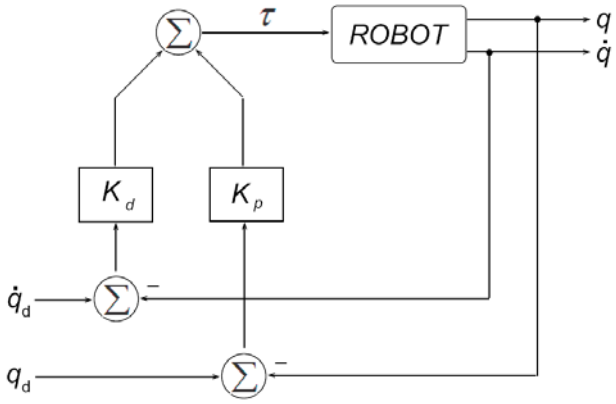


Figura 1. Diagrama de bloques del controlador PD. [13]

Otro controlador que cumple con el objetivo de control, es el controlador PD más compensador de gravedad es descrito por la ecuación

$$\tau = -K_p\tilde{q} - K_d\dot{\tilde{q}} + g(q)$$

donde $K_p, K_d \in \mathbb{R}^{n\times n}$ son matrices simétricas definidas positivas, $\tilde{q} = q - q_d \in \mathbb{R}^n$ el vector de error de posición angular, $\dot{\tilde{q}} = \dot{q} - \dot{q}_d \in \mathbb{R}^n$ el vector de error de velocidad angular y $g(q) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de gravedad del dispositivos háptico (omni phantom). El diagrama de bloques del controlador PD con compensador de gravedad es mostrado en la figura 2.

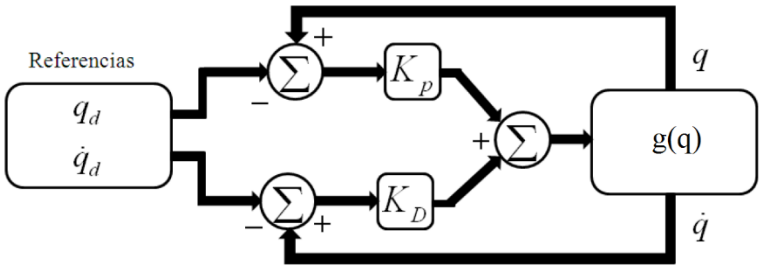


Figura 2. Diagrama de bloques del controlador PD+g(q). [13]

Este artículo muestra la teleoperación auxiliada por el ser humano, es decir envia información a través del dispositivo háptico maestro (omni phantom) que es gobernado por un operador y la información es recibida por un robot manipulador (omni phantom) que es el esclavo, dando lugar a la teleoperación. Y se emplea un control PID para controlar la posición del esclavo y no se dañe el manipulador y permitirá a disminuir los efectos de retardo.

2. Dispositivo Phantom Omni

El dispositivo que se utiliza pertenece a los dispositivos hápticos Geomagic® que proporcionan una entrada tridimensional con retroalimentación de fuerza e integran el sentido del tacto a las aplicaciones de investigación y comerciales, así como a los sistemas de modelado 3D Geomagic®.

Los dispositivos Geomagic pueden medir de forma precisa la posición espacial 3D (a lo largo de los ejes *x*, *y* y *z*) y la orientación (inclinación, giro y dirección) del lápiz de mano. Los dispositivos utilizan motores para crear las fuerzas de retorno en la mano del usuario para simular el tacto y la interacción con objetos virtuales. Están disponibles los modelos 3DOF (Degrees of Freedom - grados de libertad). [8]

Los dispositivos hápticos Geomagic se muestra en la figura 3, se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, así como proyectos de I+D vanguardistas, en los que se desea una interacción realista con el mundo digital.

Figura 3. Phantom Omni.

Los parámetros del dispositivo son

Área de trabajo	~ 6,4 An x 4,8 Al x 2,8 P pulg. > 160 An x 120 Al x 70 P mm
Rango de movimiento	Movimiento de la mano con giro de la muñeca
Resolución de la posición nomina	> 450 dpi ~ 0,055 mm
Fuerza de esfuerzo máxima en la posición nominal (brazos ortogonales)	0,75 lbf. (3,3 N)
Rigidez	Eje X > 7,3 lb/pulg. (1,26 N/mm) Eje Y > 13,4 lb/pulg. (2,31 N/mm) Eje Z > 5,9 lb/pulg. (1,02 N/mm)
Retroalimentación de fuerza (3 grados de libertad)	x, y, z
Entrada/sensor de posición (6 grados de libertad) [Gimbal del lápiz]	x, y, z (codificadores digitales) [Inclinación, giro, dirección (± 5% de potenciómetros de linealidad)]
Interfaz	Puerto IEEE-1394 FireWire®: 6 pines a 6 pines

2.1 OpenHaptics

Con aplicaciones personalizadas, de terceros y de I+D, los dispositivos Geomagic requieren el uso del kit de herramientas OpenHaptics®. Este kit de herramientas de software proporciona a los programadores la posibilidad de integrar totalmente las capacidades de un dispositivo Geomagic con aplicaciones 3D. A un alto nivel, el kit de herramientas permite la compatibilidad con el dispositivo háptico Geomagic, auténtica navegación 3D, propiedades de los materiales y compatibilidad con objetos poligonales para aplicaciones que ya usan OpenGL. A niveles inferiores, el kit de herramientas proporciona a los programadores acceso completo a los lectores del sensor, control de dispositivos, control directo del renderizado de fuerza, etc. También se incluye una microAPI QuickHaptics™ para permitir un rápido desarrollo de aplicaciones hápticas usando el código de ejemplo suministrado.

El kit de herramientas OpenHaptics está disponible de forma gratuita para uso académico [9]. Para implementaciones de programadores comerciales (OEM) o no comerciales, es necesaria una licencia de tiempo de ejecución comercial y/o programador no gratuita. El Centro de Soporte a Desarrolladores en línea de Geomagic está disponible para clientes académicos sin coste alguno, y está disponible para programadores no comerciales y de OEM con contratos de mantenimiento del software OpenHaptics activos. En este trabajo se emplean dos dispositivos hápticos omni phanton para hacer la teleoperación.

2.2 Kit de herramientas Phansim

El kit de herramientas PHANSIM [10]. Utiliza C / C ++ S-funciones junto con el kit de herramientas OpenHaptics para hacer una interfaz que proporciona a los usuarios el acceso a los insumos PHANToM par / fuerza, la postura cartesiana (posición y orientación) del cardan y los ángulos de las articulaciones de la dispositivo en el entorno Simulink. El kit de herramientas soporta la operación de un único dispositivo háptico así como la teleoperación de un sistema maestro-esclavo que consta de dos dispositivos hápticos. Este conjunto de herramientas permite a los usuarios implementar y probar sus controladores diseñados en los dispositivos Phantom en una manera rápida y fácil. Su instalación la omitiremos ya que podemos encontrar en la siguiente referencia [11].

3. Teleoperación

La teleoperación que se lleva acabo, es por medio de dos computadoras una de las cuales es la PC servidor, es donde se encuentra conectado el dispositivo háptico **maestro** y otra pc donde se conecta el dispositivo háptico esclavo. En ambas PC se instalaron los drivers anteriormente mencionado, además se instaló MATLAB y Simulink, que será la plataforma de comunicación, para hacer la teleoperación.

La conexión entre ambas PC, se realizó por medio de una red de área local (LAN), y a través de ella se envía la información del dispositivo maestro al esclavo.

La teleoperación se realizó utilizando el kit de herramientas PHANSIM y programación en el Editor de Matlab en ambas PC, siendo una para enviar la señal del dispositivo **maestro** y otra que recibe la señal para el dispositivo **esclavo.**

La programación se muestra en la figura 4, es con la cual se hace la conexión entre la PC servidor y la PC cliente.

Figura 4. Programa para conectar el servidor con el cliente

La PC servidor es la que está con el dispositivo maestro. Después de haber compilado mostrará un mensaje como lo muestra la figura 5, que dice cliente conectado, es decir ya hay comunicación entre ambas computadoras.

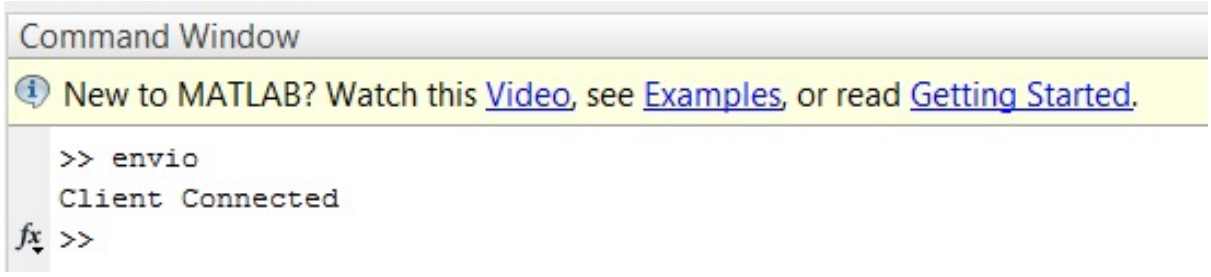


Figura 5. Mensaje de comunicación correcta

La PC cliente es la que encuentra vinculada con el dispositivo esclavo, el programa se muestra en la figura 6. Este programa se encarga de hacer la conexión con el servidor.

Editor - C:\Users\LSEyM11\Desktop\puerto_matlab\recibo.m

```
1   function connectionSend = openSend(host, port)
2   global d
3   d = tcpip('148.213.117.20', 3000, 'NetworkRole', 'Client');
4   while(1)
5       try
6           fopen(d);
7           break;
8       catch
9           fprintf('%s \n','Cant find Server');
10      end
11  end
12  connectionSend = d;
13
14
```

Figura 6. Programa para conectar el cliente con el servidor (recibo.m).

Después de haber compilado el programa aparece en la ventana de Command window un mensaje como lo muestra la figura 7. El cual nos indica que ambas máquinas de encuentra conectadas y listas para enviar y recibir las señales que se le apliquen al dispositivo háptico maestro.

Command Window

```
>> recibo

   TCPIP Object : TCPIP-148.213.117.20

   Communication Settings
      RemotePort:          3000
      RemoteHost:          148.213.117.20
      Terminator:          'LF'
      NetworkRole:         client

   Communication State
      Status:              open
      RecordStatus:        off

   Read/Write State
      TransferStatus:      idle
      BytesAvailable:      0
      ValuesReceived:      0
      ValuesSent:          0
```

Figura 7. Mensaje que muestra de compilación de recibo.m

La figura 8 muestra el programa de la pc maestro para el envío de señales al otro manipulador o dispositivo háptico.

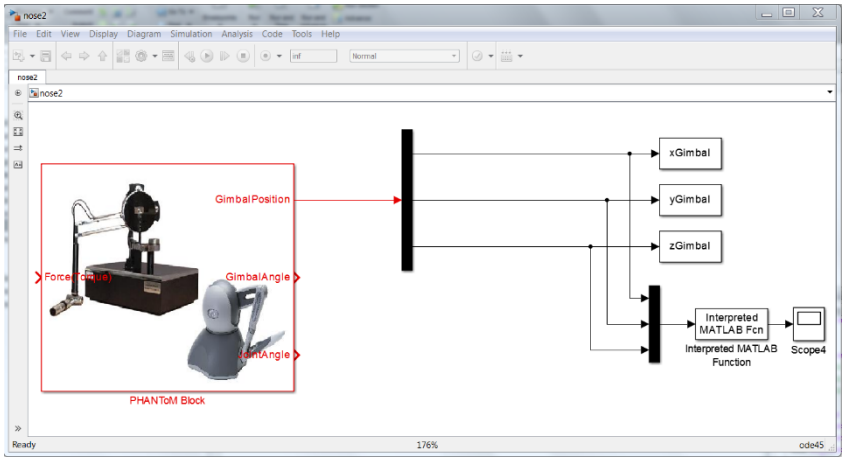


Figura 8. Diagrama de bloques para él envió de las señales.

En la figura 9 muestra el programa de MATLAB function del diagrama de bloques de Simulink, el cual se encarga de enviar la señale a la PC cliente.

Editor - C:\Users\LSEyM10\Desktop\xyzteleope\manipulacion\envios2.m

envio.m | envios2.m

```
function y =envios2(u)
global conexion
tt1 = u(1);
tt2 = u(2);
tt3 = u(3);
tt=[tt1 tt2 tt3];
fwrite(conexion,tt,'double');
y(1) = tt(1);
y(2) = tt(2);
y(3) = tt(3);

```

Figura 9. Programación de Interpreted MATLAB Function (envios2.m).

Para recibir las señales en el archivo de Simulink de la PC cliente se realizo el siguiente diagrama, tal como lo muestra la figura 10.

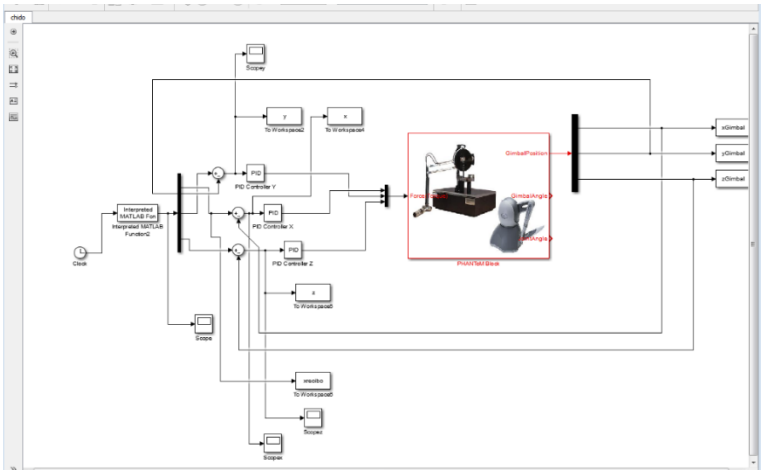


Figura 10. Diagrama de bloques para recibir las señales.

En la figura 11 muestra el programa de MATLAB, este programa se encarga de recibir las señales que le envía la PC servidor.

Editor - C:\Users\LSEyM11\Documents\MATLAB\recibos2.m

```
1   function y = recibos2 (u)
2 -   global d
3     %tt = u(1);
4 -   info = fread(d, [3 1], 'double');
5     % assignin('base','info1',info);
6 -   y(1)=info(1);
7 -   y(2)=info(2);
8 -   y(3)=info(3);
9 -   end
```

Figura 11. Programación de Interpreted MATLAB Function (recibos2.m).

4. Resultados

Para realizar los experimentos de la teleoperación se necesitaros dos dispositivos hápticos tal como se muestra en la figura 12, el que se encuentra del lado izquierdo funge como el dispositivo maestro, el cual es gobernado por el operador. El que se encuentra del lado derecho toma el papel del dispositivo esclavo, quien recibe la señal por medio de la teleoperación y sigue la trayectoria.

El primer experimento consiste en realizar teleoperación con dispositivos hápticos, uno de ellos es el maestro y se encarga de enviar la señal de referencia, el segundo dispositivo háptico es el esclavo y se encarga de recibir la señal de referencia y con el controlador PD

$$\tau = -K_p\tilde{q} - K_d\dot{\tilde{q}}$$

Sigue las trayectorias, como se observa la figura 13 la señal de rojo es la que envía el maestro en coordenadas articulares y la señal azul es la que sigue el esclavo, como se puede observar tienen un buen seguimiento.

Figura 12. Equipo experimental.

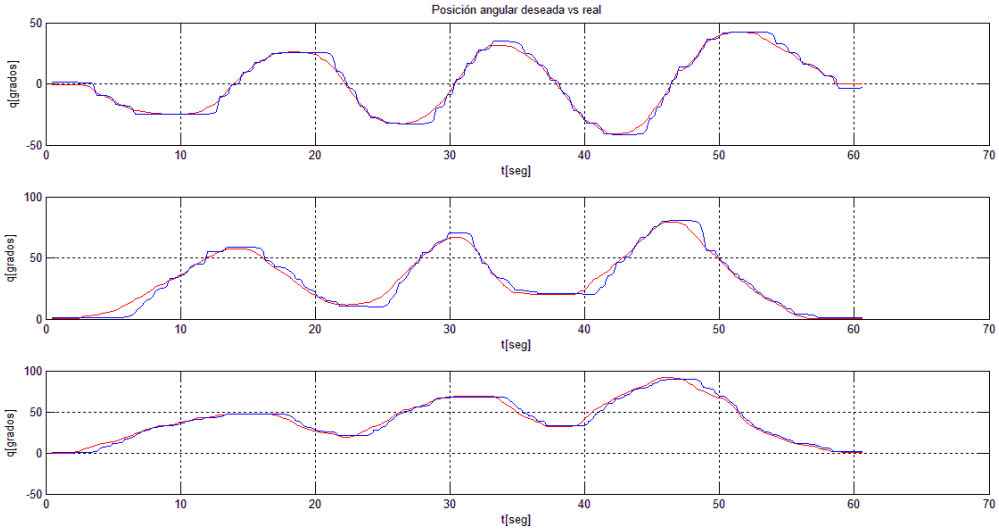


Figura 13. Posición articular deseada vs posición real.

De igual forma en la figura 14 se hace la comparación en coordenadas cartesianas, la señal de rojo es la que envía el maestro y la señal azul es la que sigue el esclavo, como se puede observar tienen también un buen seguimiento, por lo que el controlador PD funciona correctamente. Sin embargo la articulación 2 y 3 tienen los efectos de gravedad, lo que no tienen un buen seguimiento, pero es aceptable.

El segundo experimento consiste en realizar teleoperación con los mismos dispositivos hápticos, el primero es el maestro y se encarga de enviar la señal de referencia, el segundo dispositivo háptico es el esclavo y se encarga de recibir la señal de referencia y con el controlador PD mas compensador de gravedad

$$\tau = -K_p\tilde{q} - K_d\dot{\tilde{q}} + g(q)$$

Sigue las trayectorias, como se observa la figura 15 la señal de rojo es la que envía el maestro en coordenadas articulares y la señal azul es la que sigue el esclavo, como se puede observar tienen un mejor desempeño, ya que el vector de gravedad ayuda a disminuir los errores de las dos últimas articulaciones dos y tres.

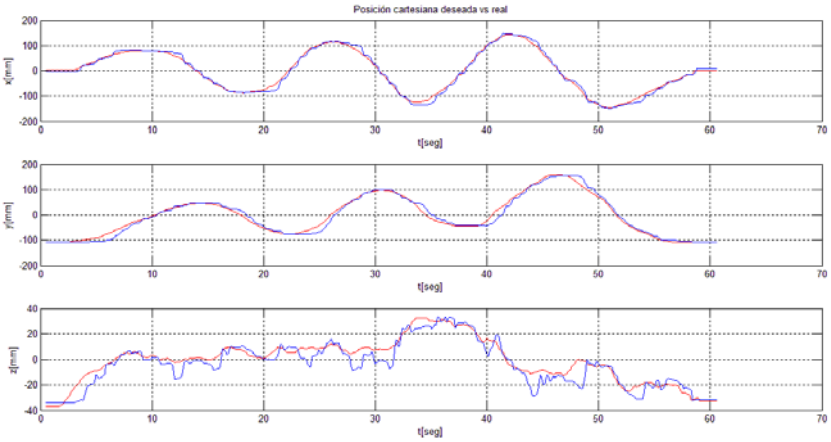


Figura 14. Posición cartesiana deseada vs posición real.

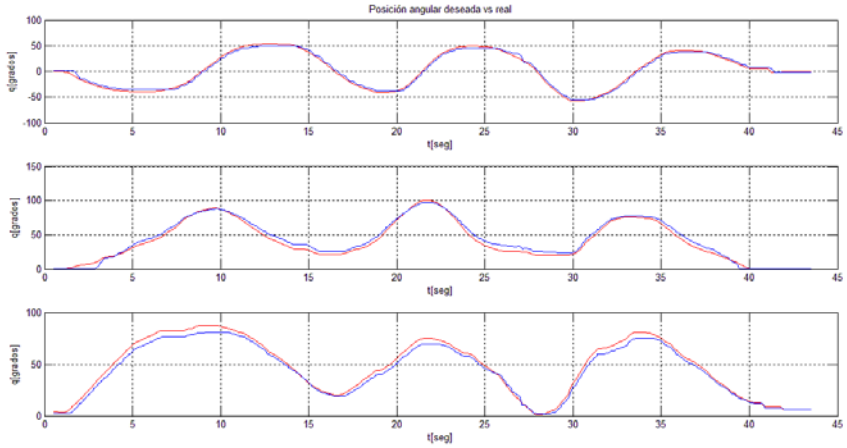


Figura 15. Posición articular deseada vs posición real.

De la misma manera en la figura 16 se hace la comparación en coordenadas cartesianas, la señal de rojo es la que envía el maestro y la señal azul es la que sigue el esclavo, como se puede observar tienen también un buen seguimiento, por lo que el controlador PD con compensador de gravedad funciona correctamente. Mejorando el seguimiento de las señales al tener un controlador no lineal como es el PD mas compensador de gravedad, por lo que se tiene mejor.

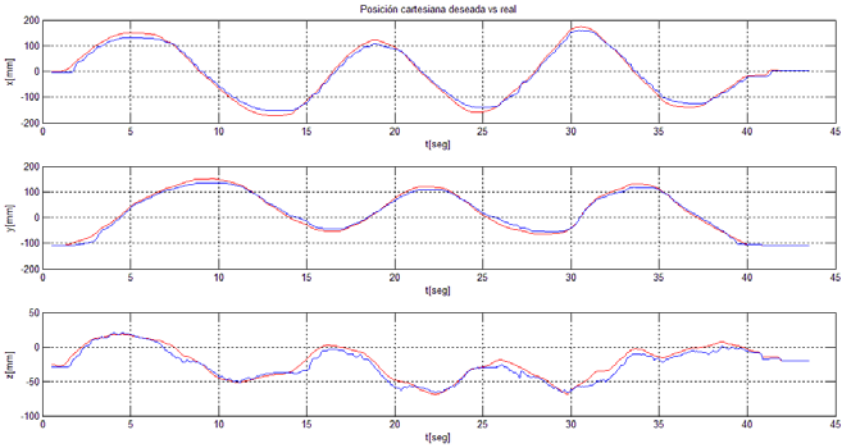


Figura 14. Posición cartesiana deseada vs posición real.

5. Conclusiones

Este trabajo de investigación tuvo como principal propósito de construir una plataforma experimental de teleoperación con dos dispositivos hápticos.

Se implementaron dos controladores PD y PD con compensador de gravedad para robots manipuladores rígidos. Se puede observar claramente que el controlador con mejor desempeño fue el segundo, por lo que en un futuro la idea es implementar un controlador no lineal que contenga parte del modelo de los dispositivos hápticos para mejorar su desempeño.

Los experimentos de teleoperación se desarrollaron en la herramienta Matlab y Simulink ya que tiene una plataforma muy sencilla para lograr la comunicación entre los dos dispositivos hápticos, sin embargo una de sus principales inconvenientes es su tiempo de retardo, pero con los controladores hace menos notable este problema.

La manipulación háptica en conjunto con la teleoperación resulta una herramienta de fácil uso para el control de un sistema. Una vez implementado el sistema de control y comunicación, el operador no requiere entrenamiento especial para la manipulación del dispositivo maestro y poder ver reflejado sus movimientos en el dispositivo esclavo.

El retardo de tiempo fue uno de los principales inconvenientes en la implementación de la teleoperación por medio de Matlab y específicamente con el protocolo de comunicación TCP/IP que brinda éste, se recomienda, como trabajo a futuro, buscar alternativas que permitan la transmisión de datos en tiempo real, ya sea por medio de una tarjeta de adquisición de datos u otra plataforma que permita manejar éste protocolo de comunicación y no se tenga que hacer a través de Matlab.

Para completar la teleoperación, la sintonización de las ganancias fue la que llevo tiempo en la implementación del control PD para el seguimiento de la trayectoria recibida por parte del dispositivo esclavo. A pesar de que se cuenta con amplia información referente a éste tipo de control, la sintonización de ganancias siempre resulta tedioso y depende del programador ajustarlas para tener el mejor desempeño, si esto no sucede, resultará en un seguimiento con muchas vibraciones y por consiguiente se desestabiliza del dispositivo esclavo.

Referencias

[1] Raya L. "*Visión global sobre tecnología háptica*". Autores científico-técnicos y académicos. pp 116-117
[2] Aviña A., Hernández E. *"Guiado Háptico local con perspectivas de diagnóstico y rehabilitación neuropsicológica"*, Tesis para obtener el título de ingeniero, pp 13-14 y 2006.
[3] Cui, Jianhong, etal. "A review of teleoperation system control." Preceedings of the 2003 Florida conference recet advances in robotics (FCRAR), Florida Atlantic University,FL. 2003
[4] Alvarado D., Butrón M., Díaz D., González L.. *"Teleoperación Háptica de Brazo Manipulador". Instituto Politécnico Nacional, pp 1-6 2013.*

[5] Nuño E., Basañez L.. *"Teleoperación". Universitat Politècnica de Catalunya, pp 1-15 y 2004.*
[6] Ayala A., García L., Reyna G.. *"Desarrollo de un Sistema Robótico Háptico para Aplicaciones Biomédicas". Instituto Politécnico Nacional, pp 1-85 2008.*
[7] Améstegui M. "Control PID".Universidad Mayor de San Andres. Pp 1-5.
[8] OpenHaptics Toolkit, The SenSable Technologies Inc., USA, http://www.sensable.com/products-openhapticstoolkit.htm/.
[9] Geomagic support ceter. http://support1.geomagic.com/link/portal/5605/5668/Article/2377/Haptic Device-Drivers
[10] Telerobótico y Biorobotic Sistemas. http://www.ece.ualberta.ca/~tbs/pmwiki/index.php?n=Research.PHANSIMToolkitForTheSenSablePHANToMHapticDevices
[11] Mohammadi A., Tavakoi M., Jazayeri A.. *"PHANSI TOOLKIT Quick Guide". Department of Electrical and Computer Engineering. University of Alberta. Version 1.02, pp 1-8, 2010.*
[12] Ogata K. "Ingeniería de Control Moderna",Editorial Pearson, EEUU, 3ra edición, 1998.
[13] Kelly R., Santivañez V. "Control de movimiento de robots manipuladores". Pearson Prentice Hall, 2003.

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

15. Implementación de la cinemática de movimientos secuenciales en rodilla automatizada

Rangel D.[1], Suárez C.[1,2], Chagolla H.[2], Olvera A.[1], Estévez M.[1]

ranged@fata.unam.mx

1.-Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, UNAM. Boulevard Juriquilla No. 3001, Col. Juriquilla. C. P. 76230. Queretaro, Qro., México
ranged@fata.unam.mx

2.-Division de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Querétaro. Av. Tecnológico Esq. M. Escobedo. S/N. C. P. 76000. Querétaro, Qro., México

Resumen

En este trabajo se presenta la implementación de la cinemática de movimientos secuenciales y transitorios que pueden llevarse a cabo en un prototipo automatizado de articulación de la rodilla de 6 grados de libertad, usado para prueba de meniscos sintéticos. Se programaron movimientos en el prototipo de rodilla para implementar la cinemática de cada elemento que compone esta articulación y posteriormente generar un movimiento conjugado como lo es la emulación del ciclo de marcha de una persona. Así mismo, se programó la secuencia de aplicación de impacto mecánico sobre un menisco inserto entre la tibia y el fémur, pudiendo reproducir con ello los transitorios de fuerza que recaen sobre este elemento de la rodilla cuando está expuesto a sobreesfuerzos como lo es en un salto, tropezón o frenado intempestivo de una persona. Las rutinas de movimiento fueron programadas con microcontroladores en configuración maestro-esclavo, lo que permitió la sincronización de los movimientos en el tiempo, en concordancia a la cinemática natural de la articulación. De acuerdo a los resultados obtenidos, podemos establecer que este modelo automatizado de rodilla reproduce fehacientemente la cinemática de los movimientos secuenciales de marcha y de impacto, y por lo tanto esos movimientos programados pueden ser utilizados en la prueba de meniscos sintéticos.

Palabras clave: Rodilla, Meniscos, Secuencial, Marcha, Impacto, Prototipo.

1. Introducción

La rodilla se ha convertido recientemente en objeto de estudio por la importancia que tiene en la movilidad de las personas [1]. Debido a su complejidad funcional y la poca respuesta en el sector salud en México para atender problemas de esta articulación, es necesario buscar soluciones de fondo que ayuden a las personas que han presentado problemas en dicha articulación en algún momento de su vida. En esta exploración, las nuevas alternativas tienen que abarcar aspectos que permitan al paciente recuperar la movilidad en los casos en que ésta se pierde debido a accidentes, que pueden dañar de manera parcial o total la articulación, desgaste o rotura de algunos elementos que constituyen la amortiguación en la extremidad inferior, por sobrepeso o ejercicio excesivo, como son los meniscos [2], ligamentos, cartílago [3], músculos etc., en los que es de suma importancia el arreglo parcial o el reemplazo total de alguno o varios de estos elementos y finalmente la estructura ósea sin la cual sería imposible el movimiento articulado [4].

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Se han realizado investigaciones, experimentos, simulaciones y la modelación de la articulación. Desde un punto de vista funcional ha de conjugar dos objetivos casi excluyentes entre sí, como son la gran estabilidad y resistencia al peso que tiene que soportar, y la movilidad suficiente para trasladarlo.

Para describir la biomecánica de la rodilla es necesario tener en cuenta los planos y los ejes de cada uno de los diferentes movimientos que se realizan en la rodilla. Existen tres planos mutuamente perpendiculares en los que la mayoría de los movimientos de las articulaciones ocurren. Estos sistemas ortogonales pueden ser descritos dependiendo del punto de intersección común en los planos. Este punto de intersección puede ser definido como el centro de la articulación o como centro de masa.
Para proporcionar estabilidad en la rodilla, se requiere del buen estado de la configuración ósea, así como de los meniscos, ligamentos, cartílagos y músculos. Si por alguna razón, cualquiera de estas estructuras funcionara de manera incorrecta o estuviera dañada, se produciría inestabilidad en la articulación de la rodilla.

2. Materiales y Métodos

2.1 Implementación de movimientos secuenciales

El prototipo automatizado de rodilla utilizado en las pruebas de menisco, el cual no es presentado en este trabajo, ha sido descrito en [4], el cual tiene las dimensiones de una articulación natural, los intervalos de movimientos rotacional y traslacional, así como los elementos inerciales propios y torque adecuado. Los movimientos que pueden efectuarse en este prototipo de articulación están dados por la relación de las ecuaciones dinámicas de Newton-Euler, las cuales describen a un sistema dinámico en función de la fuerza y el momento. Ellas incorporan todas la fuerzas y momentos de actúan sobre cada elemento de la articulación incluyendo fuerzas de restricción actuando entre uniones adyacentes. Esta relación se muestra en la ecuación (1).

$$\tau_i = \sum_{j+1}^{n} H_{ij}\,\ddot{q}_j + \sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n} h_{ijk}\,\dot{q}_j\,\dot{q}_k + G_i\,, \qquad i = 1, \ldots\ldots, n \quad (1)$$

Donde los coeficientes H_{ij} , h_{ijk}, y G_i son funciones de los desplazamientos $q_1, q_2, \ldots, q_n$ de la articulación. Cuando fuerzas externas actúan sobre la articulación la parte de la izquierda de la ecuación debe ser modificada [5]. En la figura 1 se muestra un esquema virtual donde se observan las principales partes de este prototipo biomecatrónico automatizado de articulación de rodilla en donde fue implementada la cinemática de movimientos secuenciales.

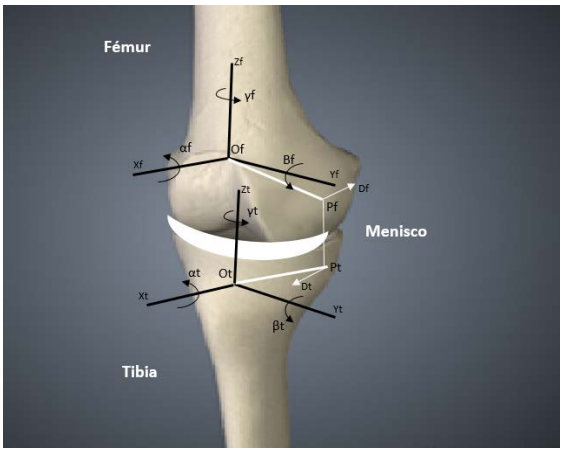


Figura 1. Esquema virtual del prototipo de articulación de rodilla y ejes coordenados.

Para implementar los movimientos secuenciales en la rodilla automatizada, fue importante construir una arquitectura de procesamiento de datos que permitiera controlar los motores con reductor de manera simultánea. Para ello se propuso la configuración maestro-esclavo entre microcontroladores PIC de microchip.

Una vez diseñado y construido el prototipo biomecatrónico de rodilla se procedió a realizar pruebas con algunos movimientos típicos de esta articulación, lo cuales ya están estandarizados en modelos de 6 grados de libertad. Se han hecho algunos estudios sobre movimientos hechos por la rodilla y están reportados en [6], como es el caso de la marcha, donde a través de pruebas de repetibilidad se estudió la cinemática de la rodilla con un modelo convencional. Así mismo se ha reportado cómo influyen otros elementos que intervienen en la dinámica de la articulación, en este caso con un artefacto que simula la piel, con personas en vivo [7]. En ese trabajo se concluye que incluir este tipo de elementos permite ver que la complejidad de un modelo de rodilla y la cinemática implicada aumenta cuando se introducen bioelementos no lineales como la piel o un menisco sintético.
De acuerdo a la metodología empleada en este trabajo, fue necesario primeramente el estudio de la cinemática correcta de los movimientos de cada elemento individual de la articulación, para posteriormente programar los movimientos de impacto y marcha en las pruebas hechas con un menisco sintético inserto entre el fémur y la tibia. Estos movimientos tienen una cinemática ya conocida, la cual es reportada en la literatura.

El prototipo utilizado en este trabajo tiene 6 grados de libertad, con lo cual es posible llevar a cabo todos los movimientos naturales de la rodilla, tanto en régimen transitorio como en régimen permanente de 0 a 100% del ciclo de marcha.

2.2 Movimientos realizados por el prototipo de la articulación de la rodilla

Uno de esos movimientos es aquel que puede mover el fémur hacia los lados con un ángulo de inclinación de hasta 3° hacia el interior y hasta 6° hacia el exterior, a partir del eje vertical. En la figura 2 se muestra la secuencia del movimiento lateral de fémur partiendo del eje vertical en 0°, la línea continua tipo sinusoidal marca la trayectoria ideal, la cual llega hasta un máximo de 3° hacia el interior, sufre una desaceleración el fémur y regresa a su posición original.

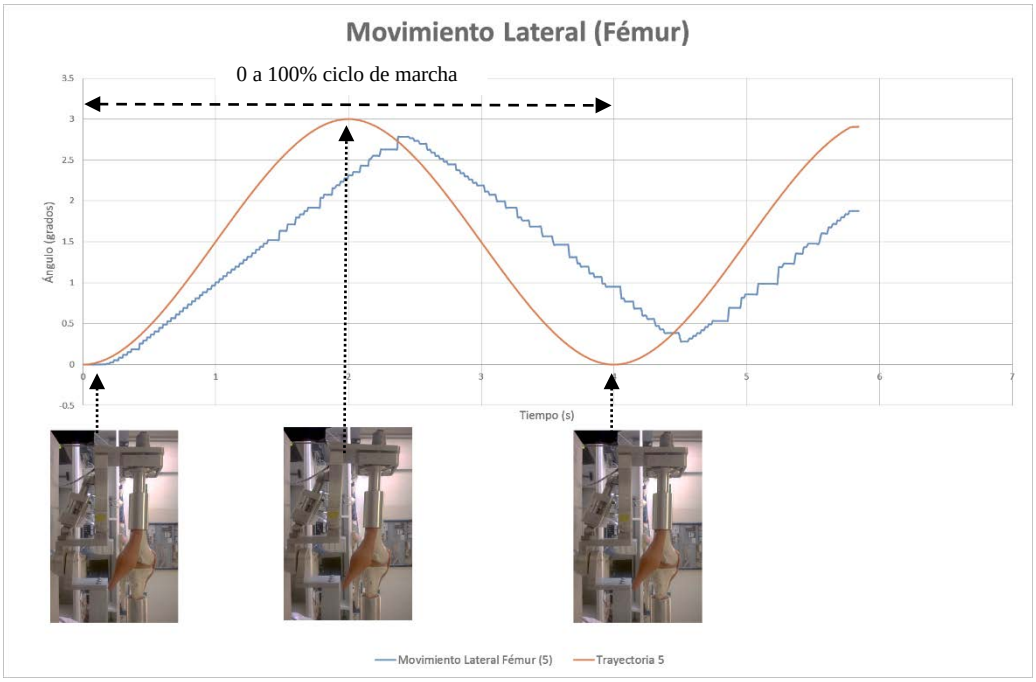


Figura 2. Movimiento lateral fémur y la secuencia desde 0 a 3° hacia el interior de la extremidad.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

La línea zigzagueante indica la trayectoria real, la cual se caracteriza por partir también en 0°, continuando con una velocidad angular constante debido a que el motor que origina este movimiento tiene una tasa reductora de velocidad de 60:1, lo que implica que mantiene su velocidad nominal con PWM y por lo tanto se mueve a velocidad constante.

Lo mismo sucede en el regreso, faltando inclusive 0.25° para completar la trayectoria. Se puede observar claramente un desfasamiento entre la trayectoria real y la ideal, lo cual es debido la influencia del peso del fémur. Así mismo se muestran secuencias de fotografías, donde es posible apreciar este movimiento lateral, mostrando el inicio, en su posición más extrema y regresando a su posición original. Pero debido a que es muy pequeño este desplazamiento no se observa magnificado ese cambio.

Cuando hay un inicio de marcha al caminar, se tiene un movimiento de traslación del fémur hacia adelante, debido a que se va modificando la distribución de los esfuerzos que recaen sobre el menisco y éste a su vez los transmite a la tibia. Este desplazamiento tiene un valor máximo de 3mm, sin embargo en este caso el promedio es de 2mm. En la figura 3 se muestra la secuencia del desplazamiento frontal de fémur en condiciones sin carga, solo con la fricción de los huesos con el menisco, la cual se ve reflejada en el desfasamiento que se observa entre la trayectoria ideal (línea continua) y la trayectoria real (línea zigzagueante). Sobre todo, este efecto se da en condiciones de regreso a su posición original.

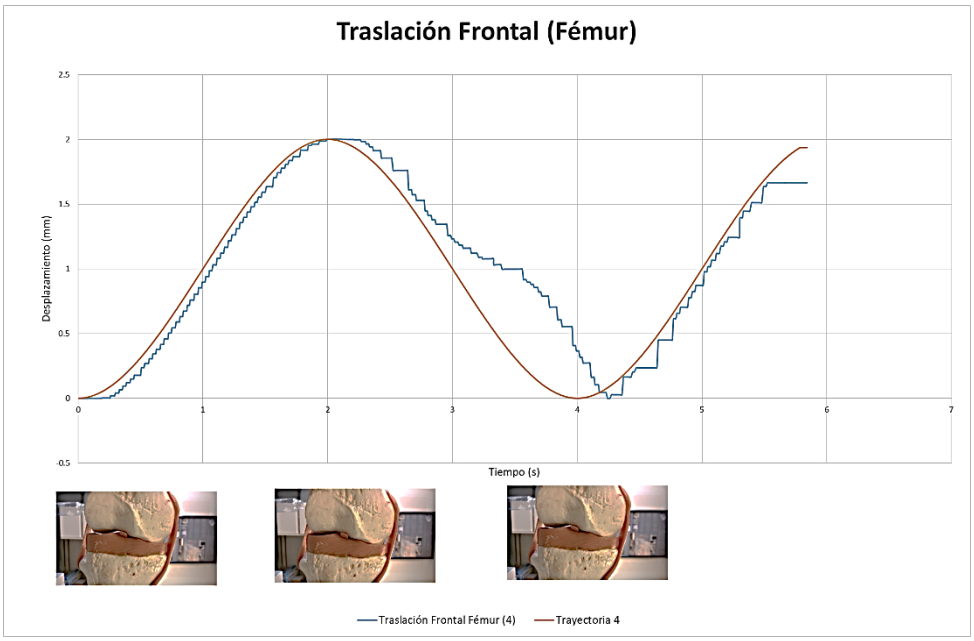


Figura 3. Translación frontal fémur y la secuencia de tiempos de ida y regreso.

En las fotografías mostradas en la misma figura 3, se puede observar que existe un pequeño orificio arriba del menisco (ubicado entre el fémur y la tibia) y que una vez que se cierra el ciclo de traslación del fémur vuelve a aparecer este hueco, lo cual es indicativo de que se desplazó el fémur hacia adelante y regresó a su posición original.

Un movimiento muy importante que protege a la articulación, es el que permite rotar la tibia en ángulos de ± 3° hacia la derecha o a la izquierda respecto al eje vertical. Este movimiento se lleva a cabo en este prototipo a una tasa de velocidad de 1.5°/segundo, como se observa en la figura 4. Cabe mencionar que en este movimiento la trayectoria real sigue fehacientemente el movimiento ideal salvo un retraso de 200ms al inicio de la trayectoria.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

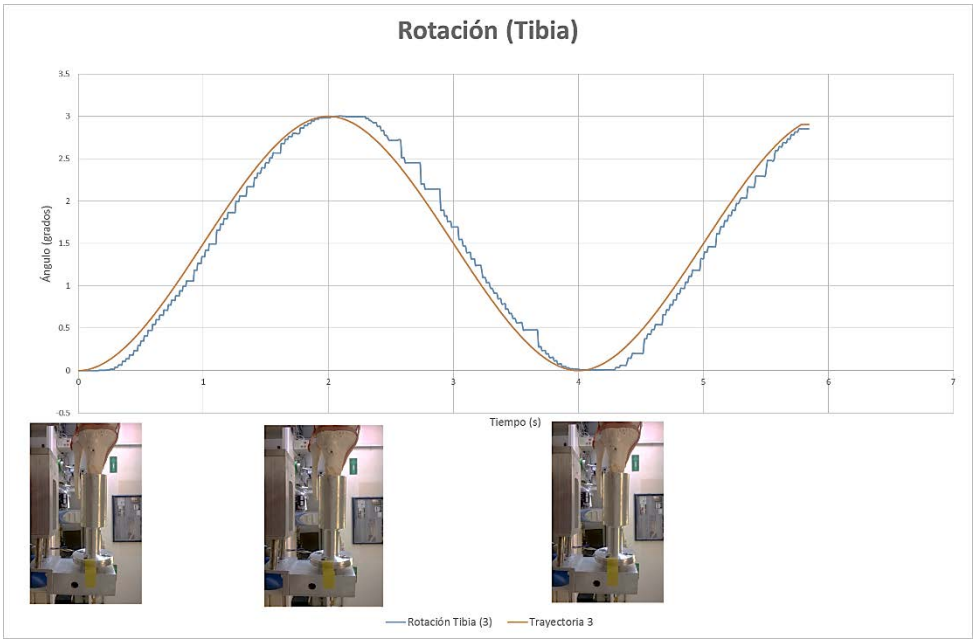


Figura 4. Secuencia de la cinemática de rotación de la tibia sobre su eje vertical.

Esta rotación, como se ha mencionado, se lleva a cabo mediante un motor de CD con reductor, lo cual implica una disminución de la velocidad nominal del motor con su consecuente incremento de torque. La ventaja de hacer este movimiento con los motores de CD es precisamente que puede modificar su velocidad con la señal tipo PWM, que permite acelerar y desacelerar en tiempos muy cortos y la inercia mecánica dada por el reductor, ayuda en el paro e inicio exacto de la posición.

Para llevar a cabo la secuencia de flexión y extensión al caminar, es necesario reproducir primero por separado el movimiento angular del cada elemento. En este caso intervienen el fémur y la tibia, los cuales en conjunto y en sincronía proveen la secuencia para reproducir un ciclo de marcha. Cada elemento tiene trayectorias y ángulos de rotación limitados, los cuales son totalmente reproducibles en este modelo biomecatrónico. Para reproducir la cinemática de la marcha al caminar se tiene que fijar un sistema de coordenadas en un plano lateral, donde un eje vertical es la referencia (figura 5).

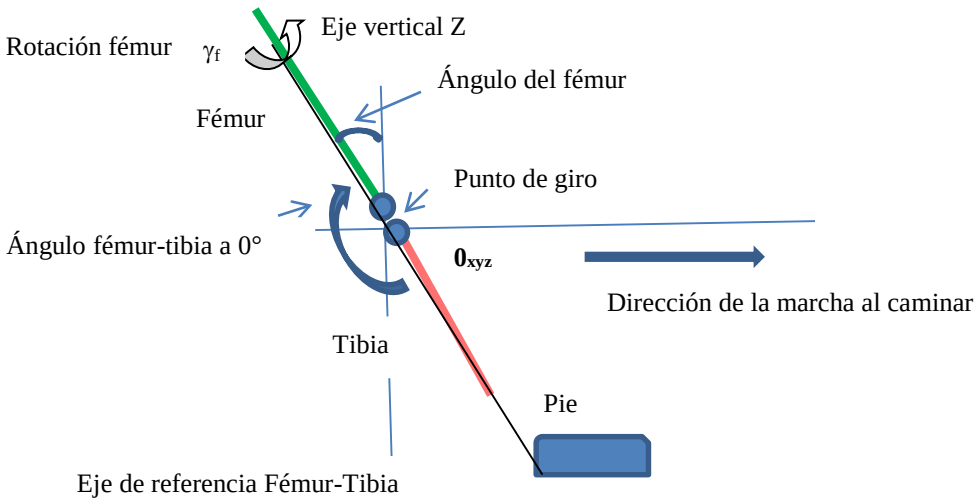


Figura 5. Plano lateral de inicio de marcha con sistema de ejes de referencia.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

En un inicio la marcha tiene al eje fémur-tibia como referencia a 0°, el fémur está colocado a 35° aproximadamente de la vertical.

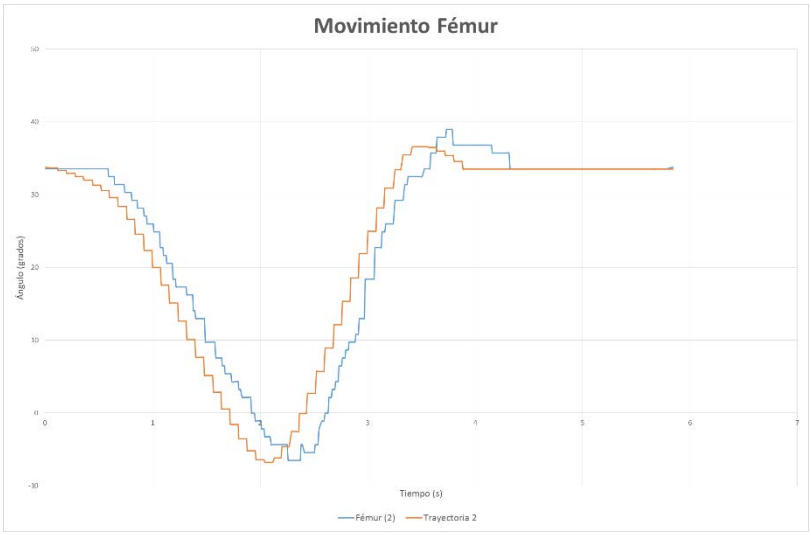


Figura 6. Progresión del movimiento del fémur durante un ciclo de marcha.

Durante el ciclo de marcha existen aceleraciones y desaceleraciones, al inicio y cuando los huesos de la articulación llegan a sus ángulos máximos, incluso se puede observar (Figura 6), que el fémur se adelanta al eje vertical 5° en la mitad del ciclo, para después retroceder a su posición original. Este movimiento fue emulado en un tiempo de 4 segundos, para ilustrar el paso de una persona a una velocidad lenta y analizar la cinemática punto a punto. La línea de “Trayectoria 2” señala el movimiento ideal del fémur al caminar.

Para complementar el ciclo de marcha también se debe mostrar la trayectoria que sigue la tibia desde el inicio de la marcha con un pequeño ángulo de aproximadamente 3°, respecto al eje fémur-tibia como se aprecia en el esquema de la figura 7.

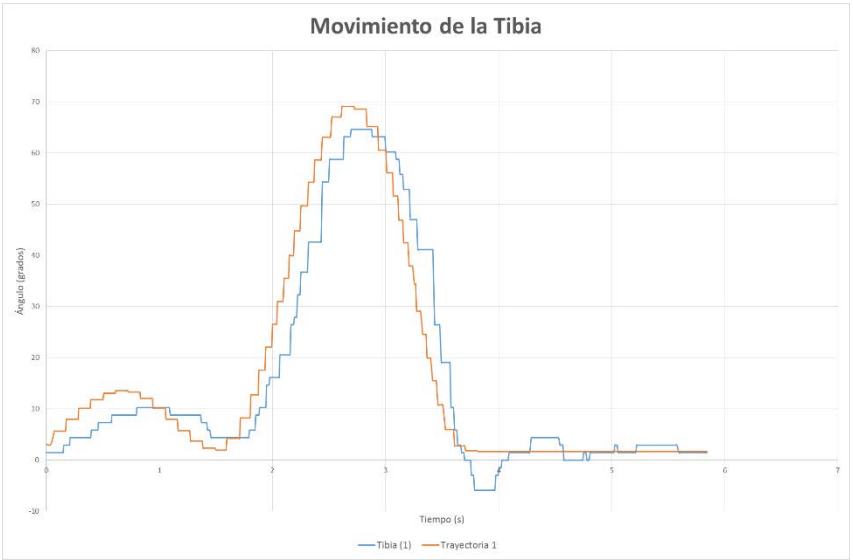


Figura 7. Trayectoria del movimiento de la tibia cuando transcurre un ciclo de marcha.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

En la figura 7 se muestra el movimiento de flexión de la tibia, que inicia cuando ésta va hacia adelante de 0° a 15° por enfrente del eje fémur-tibia y vuelve a posicionarse en 0° con velocidad angular de 10°/segundo.

Posteriormente hay un incremento súbito de la aceleración para alcanzar 70°, que es alcanzado en un tiempo de 2.8 segundos, para después regresar a 0° en un tiempo de 4 segundos, que empata con el tiempo del movimiento del fémur durante un ciclo de marcha. La línea de "Trayectoria 1" es una trayectoria reportada en la literatura para un ciclo de marcha ideal de una persona [6].

Cabe mencionar que los datos son recabados a una tasa de muestreo de 12.5 muestras/segundo por lo que en la figura 7 se aprecian las trayectorias de una forma discretizada.

2.3 Pruebas de Impacto

Se hicieron pruebas de impacto (transitorio de fuerza) para simular los esfuerzos que actúan sobre el menisco en tiempos muy cortos y de gran magnitud. Estas fuerzas son aquellas que se producen cuando la articulación de la rodilla es expuesta a una carga excesiva en un salto o en una caída. Así mismo se presentan fuerzas de impacto cuando se inicia la marcha o cuando se detiene la persona intempestivamente. Las pruebas de impacto fueron realizadas en el prototipo biomecatrónico acondicionando un pistón neumático que proporciona esfuerzos concentrados hasta de 20kg/cm^2. En la figura 8 se muestra el pistón neumático, el cual tiene una carrera lineal de 10mm y cuya presión puede aplicarse en aproximadamente en 1 segundo.

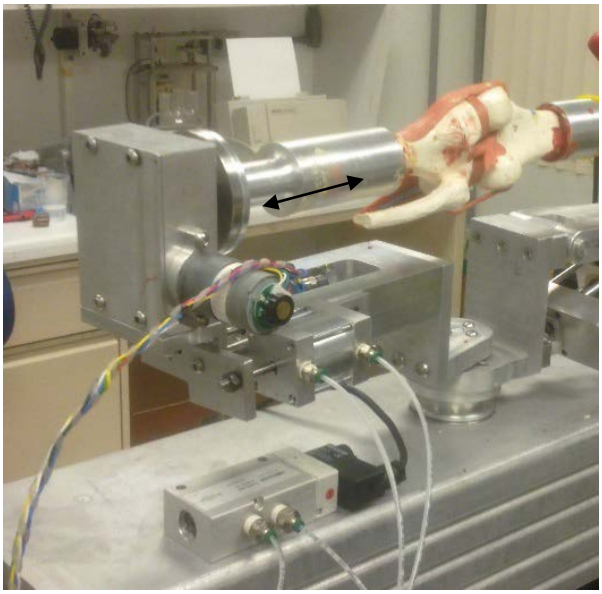


Figura 8. Dispositivo neumático acoplado al prototipo mecatrónico para pruebas de impacto.

La inyección de aire para dirigir el movimiento hacia adelante y hacia atrás es controlada por una servoválvula de 24VCD, y a través de mangueras de 3mm de diámetro es posible la conducción de aire por un compresor de hasta 100PSI.

Se llevaron a cabo movimientos secuenciales para pruebas de impacto en distintos puntos del área meniscal, tanto en el menisco externo como en el menisco interno. En la figura 9 se muestra la instalación de sensores flexiforce® modelo 250 que junto con el software Tekscan® permiten monitorear la fuerza ejercida por la acción del pistón al impactar sobre el menisco en cada instante de tiempo. La flecha indica la posición del sensor junto al ligamento lateral.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

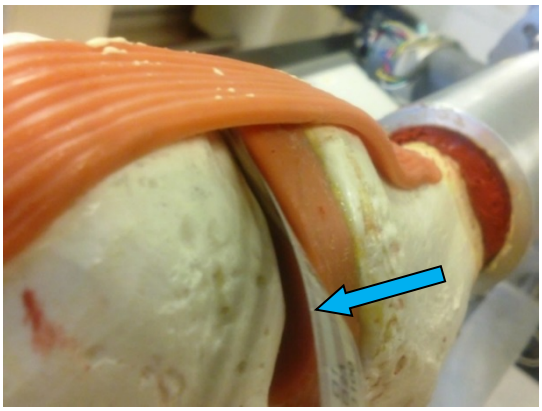


Figura 9. Colocación de un sensor de fuerza en prueba de impacto sobre el menisco externo.

3. Resultados

Se implementó la secuencia de la marcha con los dos elementos principales que intervienen en este movimiento, como lo es el fémur y la tibia, se muestran en la figura 10 las trayectorias reales e ideales de ambos huesos.

En la programación de los movimientos se recurrió a investigar la cinemática de esta articulación para sincronizar cada elemento en movimientos conjugados, sin carga mecánica extra más que el peso de los elementos que componen la articulación. Se acotaron los intervalos de flexión de cada elemento y se limitó la carrera de la trayectoria del fémur hacia adelante.

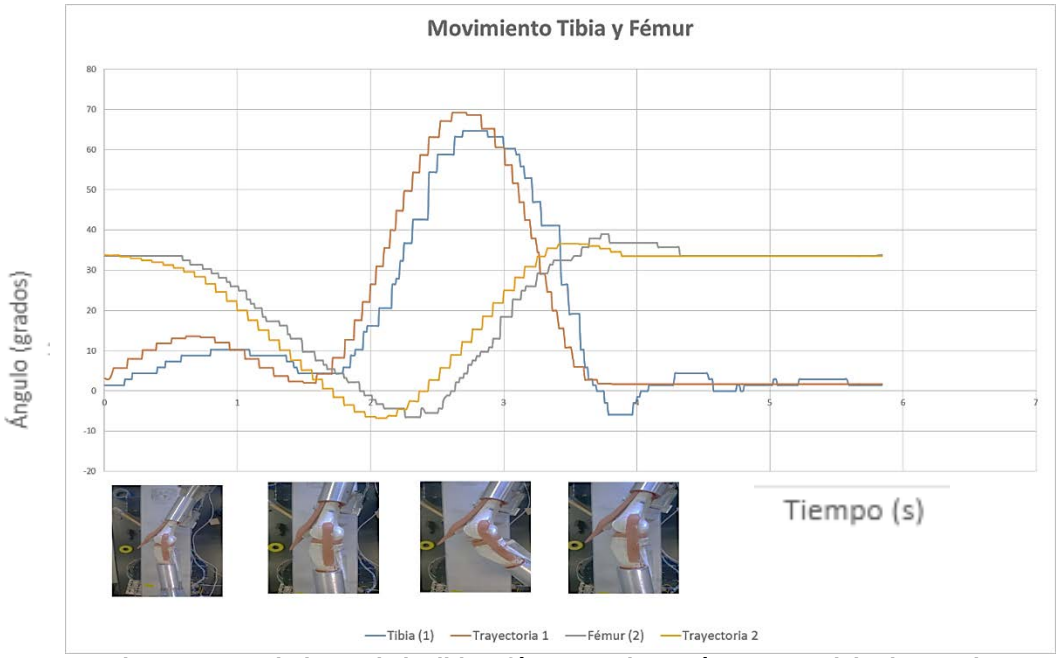


Figura 10. Movimiento de la tibia y fémur en sincronía para un ciclo de marcha.

Como podemos observar en la figura 10 se tomaron fotografías de la secuencia del fémur y tibia flexionando juntos, donde se puede apreciar cómo van flexionando los dos huesos en el prototipo de

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

rodilla. Se aprecia también la forma en que se reparten los esfuerzos debido al menisco inserto entre los dos huesos, los ligamentos laterales y ligamento cruzado.

También, en el punto máximo de flexión del fémur, hay un máximo de flexión de la tibia, solo con un retraso de 0.5 s, dicho retraso se debe a que el fémur recorre un poco más hacia adelante por el movimiento de traslación de 3mm hacia delante de acuerdo a su movimiento en una rodilla natural. Las trayectorias reales son seguidas muy de cerca por las trayectorias ideales.
Con todos los grados de libertad del prototipo funcionando sincronizadamente, se puede emular el movimiento natural de la rodilla. Cada grado de libertad representa cada punto de rotación, traslación o flexión de los huesos que componen a la rodilla.

En la figura 11 se puede observar el movimiento de un ciclo de marcha utilizando 5 grados de libertad en el prototipo. El primero es llamado Tibia (1), durante el cual la tibia se flexiona para caminar; el segundo es la translación frontal del fémur, en el cual el fémur va recorriendo su trayectoria lineal hacia el frente para ir acomodando el centro de gravedad del cuerpo y distribuir el peso de manera proporcional al ángulo requerido. El tercer grado de libertad se debe a la flexión del fémur del cual se ya se mencionó en párrafos anteriores.

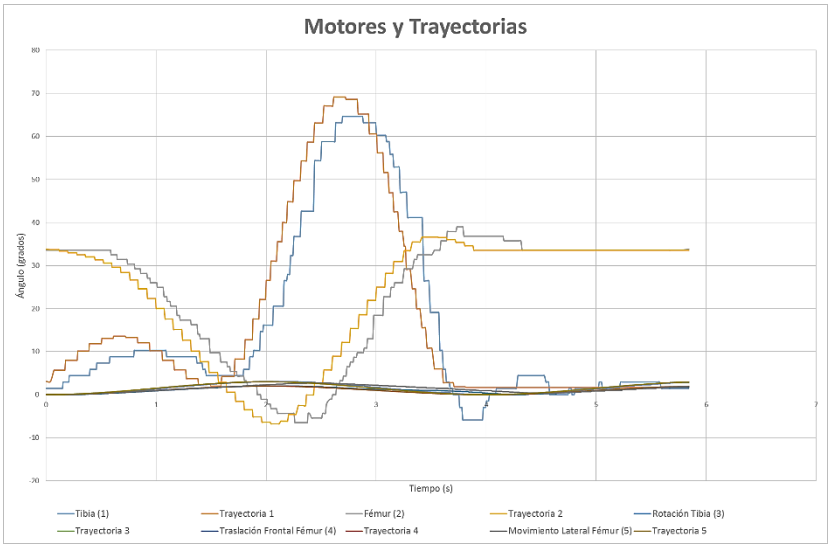


Figura 11. Trayectorias sincronizadas para dar lugar a un ciclo de marcha en la rodilla.

El cuarto grado de libertad de debe al movimiento lateral del fémur, que a la vez que protege de alguna deformación de la extremidad por el llamado defecto valgo o cavo, es decir si el fémur tiene una inclinación hacia adentro o hacia afuera del eje vertical, este movimiento lateral puede ayudar a corregir un poco el centro de gravedad y distribuir el peso de la persona de manera correcta, además con la marcha, las posibles deformaciones del suelo donde pisa la persona, es más fácil ir acomodando la distribución del peso sin caer. El quinto es la rotación de la tibia sobre su propio eje. Toda esta cinemática fue estudiada al implementar cualquier movimiento que puede ser realizado por la rodilla de manera natural. Así es como se caracterizaron los distintos componentes como son los motores, flechas, transmisiones mecánicas etc., los cuales no son reportados en este trabajo, además de acotar con gran precisión cada uno de los movimientos de la articulación.

Entonces, ahora es posible la reproducción de esos movimientos en el prototipo de rodilla, para poder insertar los nuevos meniscos sintéticos diseñados con nuevos biomateriales, que tienen características muy similares a los meniscos naturales. Así mismo se adecuarán las características biomecánicas de estos meniscos sintéticos para que sean probados en el prototipo biomecatrónico.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Por otro lado, se aplicaron varias secuencias de impacto para analizar la plasticidad de cada menisco, en la gráfica de la figura 12 se muestran los datos de fuerza en función del tiempo para un impacto que se aplicó en los dos primeros segundos de tiempo.

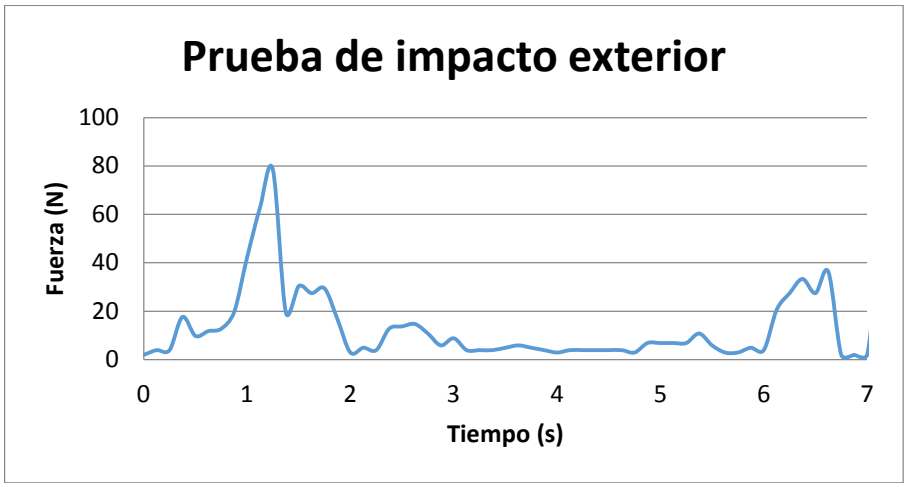


Figura 12. Aplicación de una fuerza de impacto sobre el menisco exterior.

Se puede observar que en el instante que se aplica el impulso de fuerza hay un súbito aumento de la misma hasta 80N, la cual es registrada por el software. Se observa también que una vez que cede el impacto de fuerza hay una relajación producto del amortiguamiento del menisco. Un segundo después la fuerza cede quedando solo un pequeño remanente de fuerza sobre el sensor. También se aplicaron pruebas de impacto en la parte central del área meniscal, justo donde pasa el ligamento cruzado, es decir en el menisco interior. En la figura 13 se puede notar cómo fue introducido el sensor de fuerza en el menisco interior.

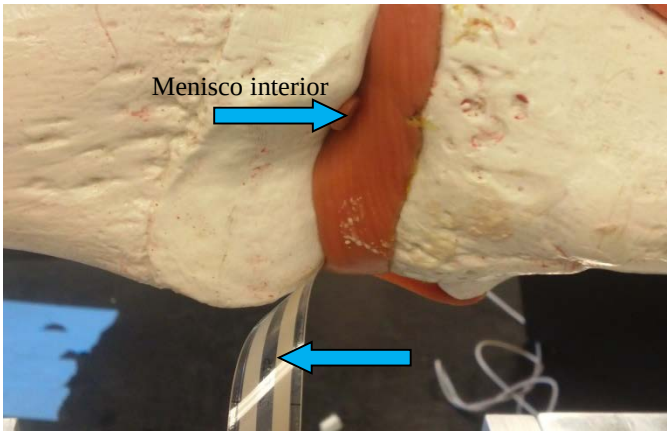


Figura 13. Aplicación de una fuerza transitoria en forma de impacto sobre el menisco interior.

Es importante conocer y analizar la manera de cómo se distribuyen los esfuerzos en la parte interna central de la rodilla, ya que se conoce que por ser distribuida uniformemente la presión en esta área debiera ser menor el impacto sobre el menisco interno. En el gráfico de la figura 14 se muestra la secuencia de aplicación de la fuerza de impacto en 1 segundo.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

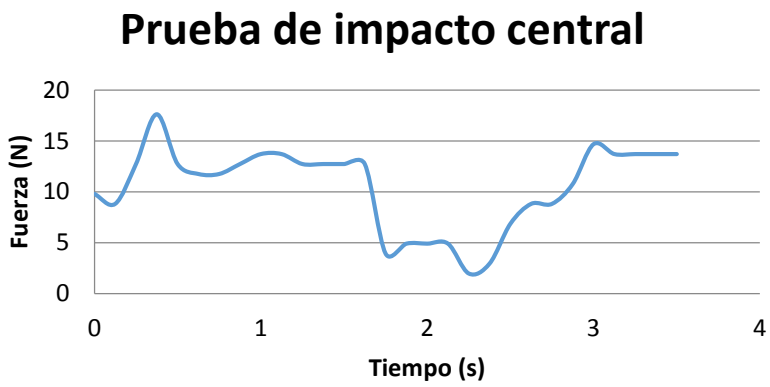


Figura 14. Gráfico de fuerza aplicada en la parte central del menisco interno.

Analizando el gráfico de la respuesta del sensor colocado en el menisco interno se observa que la fuerza es distribuida inmediatamente sobre toda el área meniscal, siendo 5 veces menor que en el área lateral, existiendo también un remanente de fuerza debido al amortiguamiento del menisco. En la figura 15 podemos observar la colocación del sensor *flexiforce 250* entre el fémur y la tibia, justo al lado del peroné y del ligamento lateral interior.

Figura 15. Prueba de impacto para analizar la capacidad del menisco lateral.

Se colocaron y alinearon los elementos del prototipo, es decir fémur y tibia en un mismo eje para evitar componentes de fuerza en otro sentido y pudiera haber datos erróneos del impacto vertical. En el gráfico de la figura 16 se observa cómo transcurre la fuerza de impacto sobre el menisco lateral interno. En el caso del impacto exterior se nota una fuerza exterior mayor ya que hubo una desalineación que “muerde” el menisco externo disminuyendo el área sobre la que recae la fuerza y por lo tanto ésta aumenta significativamente. Se observa también que después de 4 segundos la fuerza cede al cumplir el menisco con su tarea fundamental de amortiguación y disipación de energía.

Todos estos movimientos reproducidos por el prototipo biomecatrónico, tanto en el ciclo de marcha así como en transitorios de impacto, permiten caracterizar biomecánicamente los nuevos biomateriales posibles sustitutos de menisco. Esto tendrá beneficios a la gente a corto y mediano plazo, ya que se podrán diseñar meniscos a la medida de cada persona, teniendo con este prototipo una herramienta de análisis y prueba confiable, quedando para mejorar solo detalles del análisis dinámico.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

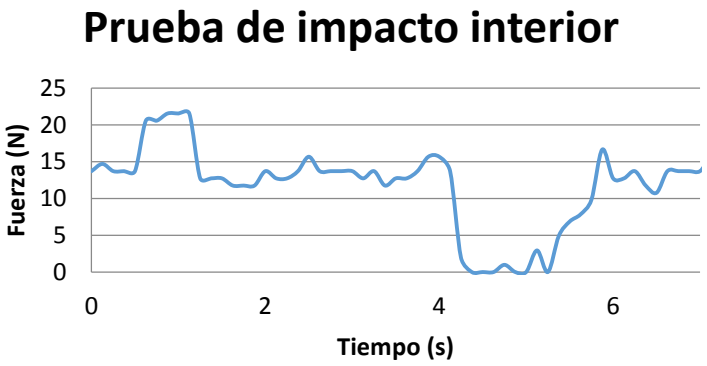


Figura 16. Progresión de la aplicación de fuerza de impacto en el menisco lateral interno.

4. Conclusiones

Se logró implementar la cinemática de movimientos secuenciales en un prototipo de rodilla automatizada. El diseño y construcción de este sistema corresponde a las características biomecánicas requeridas para reproducir movimientos articulados similares a los que realiza la rodilla naturalmente. La inclusión de bioelementos tales como meniscos insertos entre el fémur y la tibia aumentan la complejidad de los movimientos secuenciales. Se implementaron movimientos complejos de tipo transitorio y en estado permanente que semejan el inicio y frenado de marcha en una persona, así como movimientos rutinarios de flexión y extensión al caminar. Todos estos movimientos son necesarios para una prueba normal y extrema de meniscos artificiales, los cuales fueron reproducidos de manera fehaciente en el prototipo utilizado. Es importante la caracterización de este prototipo de manera estática y dinámica para su uso como herramienta en la evaluación de la respuesta y tiempo de vida de un menisco sustituto, cuando éste es sometido a esfuerzos mecánicos rutinarios y transitorios que le pueden producir daños, lo cual puede incidir en la mejora de la salud de la población.

Agradecimientos: los autores agradecen la asistencia de Andrés Cervantes por la edición de las imágenes de las secuencias de movimientos en el prototipo de rodilla.

Referencias

[1] Giles R. and Alfred J. “The Knee, a comprehensive review”, World Scientific, 2010.
[2] Bjorn A., “Artificial menisco-tibial joint”, US4728332 A, 1988.
[3] Sun A., Bai X. and Ju B. “A new method for evaluating the degeneration of articular cartilage using pulse-echo ultrasonic”, Review of Scientific Instruments 86, 2015.
[4] Rangel D., Suárez C., Chagolla G., Olvera A., Estevez M., “Implementación de movimientos complejos en modelo mecatrónico de rodilla”, Congreso Nacional de Mecatrónica, ISBN: 978-607-9394-00-4, 2014.
[5] Ozada N., “Biomechanical model of knee collateral ligament injury with six degrees of freedom”, Med. Biol. Eng. Comput., Art. In press, August 2015.
[6] Zuk M., Pezowicz C., “Kinematic Analysis of a Six-Degrees-of-Freedom Model Based on ISB Recommendation: A Repeatability Analysis and Comparison with Conventional Gait Model”, Applied Bionics and Biomechanics, Volume 2015, Article ID 503713, 9 page http://dx.doi.org/10.1155/2015/503713.
[7] Benoit D., Ramsey D., Lamontagne M., Xu L., Wretenberg P., Renström P., “Effect of skin movement artifact on knee kinematics during gait and cutting motions measured in vivo”, Gait and Posture, 24, 2, 2006.

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

16. Modelo matemático para determinar el factor de concentración de esfuerzos en una placa plana con filete y barreno

Ortega Herrera Francisco Javier[1], Garcia Salazar Diego Armando[2], Rodriguez Moreno Rafael Alejandro[1], Garcia Guzman Jose Miguel[1] y Tapia Tinoco Guillermo[1].

frortega@live.com.mx;

[1]Docente Coordinación de Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, Carr. Irapuato-Silao km 12.5, Colonia El Copal, Irapuato Guanajuato México.
[2]Estudiante de Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, Carr. Irapuato-Silao km 12.5, Colonia El Copal, Irapuato Guanajuato México.

Resumen

En el presente trabajo se desarrolla un sistema de ecuaciones que permiten determinar el factor de concentración de esfuerzos de una placa plana con un barreno y dos filetes bajo el efecto de una fuerza de tensión axial. El sistema d ecuaciones está formado por 10 ecuaciones polinómicas, las cuales permiten determinar el factor de concentración de esfuerzos presente en el filete y en el barreno de la placa bajo estudio. Para determinar el sistema de ecuaciones se realizaron 70 simulaciones en software ANSYS donde se obtuvieron los esfuerzos máximos que soporta la placa para el caso de estudio analizado, estos esfuerzos son posteriormente utilizados para determinar el factor de concentración de esfuerzos, a los valores obtenidos se les aplica una regresión polinómica mediante el método de mínimos cuadrados para ajustar dichos valores a una curva y obtener las ecuaciones que describan su comportamiento. El sistema de ecuaciones obtenido se ajusta de manera muy adecuada a los valores determinados para el factor de concentración de esfuerzos debido a que su factor de correlación R^2 varía entre 0.97 y 0.99.

Palabras clave: Concentración, Esfuerzos, Placa, Axial, Barrenos, Filetes.

1. Introducción

La concentración de esfuerzos es un factor importante que debe ser considerado al momento de diseñar cualquier tipo de estructura, máquina o mecanismo que se desee construir, el no considerar la concentración de esfuerzos puede ocasionar que nuestro sistema no cumpla con los requerimientos de funcionamiento, provocando de esta forma una falla en la operación o funcionamiento de cualquier tipo de equipo.

Muchas investigaciones se han realizado en el ámbito de la concentración de esfuerzos (CE), sobre distintos aspectos, por ejemplo, como disminuir la concentración de esfuerzos, como determinar el factor de concentración de esfuerzos para diferentes tipos de piezas y distintas situaciones de carga, algunas de las investigaciones más relevantes en este campo del conocimiento se presentan a continuación.

En una placa plana con dos agujeros cargada en sus extremos, la interacción de la CE depende de la distancia y de la relación de tamaño entre ellos [1]. En [2] se analiza la CE sobre una placa plana de espesor constante sometida a esfuerzo en sus extremos. Los esfuerzos normales aumentan con el tamaño del orificio para todos los materiales ortótropos [3]. La tensión que se genera en el entorno de un barreno circular de una placa ortotrópica cuando está sometida a tensión hidrostática en un plano, es afectada por las características elásticas del material [4].

En [5] se estudia una placa plana con un barreno en el centro, bajo los efectos de un gradiente de carga lineal. El factor teórico de CE para piezas de materiales ortotrópicos es influenciado por el tipo de carga aplicada [6]. En una abertura elíptica cuando la razón del semieje menor al semieje mayor es muy grande, el orificio tiende a ser una ranura muy delgada (grieta) lo que incrementa su CE [7].

El factor de CE no es suficiente para la predicción de falla en materiales laminados [8]. En una placa ortotrópica con un orificio rectangular y bordes redondeados los mayores factores de CE están en el eje principal el cual se encuentra a un ángulo de 67.5º respecto al eje x [9]. Existe una influencia entre las relaciones de las constantes elásticas y los factores de CE para materiales ortotrópicos [10]. En [11] se analiza la CE en una placa de longitud infinita con dos barrenos de radios iguales, utilizando un software de elemento finito, variando la distancia entre los centros de los dos barrenos y el diámetro de estos.

En [12] se analiza la distribución de esfuerzos producidas por el efecto de diversas condiciones de carga. La máxima CE para placas de anchura finita con barreno central bajo carga axial estática se produce en la periferia del barreno, además, el factor de CE es máximo en la punta del barreno (perpendicular a la carga) [13]. Por su parte, en [14] se analiza la CE en placas planas con agujeros circulares, triangulares y rectangulares, estudiando la variación de la CE debido al cambio de geometría del agujero.

En [15] presenta un modelo que se acopla al método del elemento finito para determinar los esfuerzos en las esquinas de aberturas rectangulares en placas sometidas a flexión. Por su parte [16] analizan la CE en una barra redonda con un arco circular o muesca en forma de V que soporta carga a torsión, tensión y flexión. En [17] se realiza un análisis por elementos finitos en una aleación de acero 1020 para predecir el factor de CE elasto-plastico.

En [18] se presenta la revisión de las investigaciones que se han realizado sobre el tema de análisis de esfuerzos en placas infinitas con recortes. En [19] se encuentran un conjunto de ecuaciones polinómicas de sexto grado que permiten determinar el factor de concentración de esfuerzos para en los siguientes casos de estudios: placa plana rectangular con barreno centrado, placa plana rectangular con muescas y placa plana rectangular con filetes, todos los casos son sometidos a carga de tensión axial.

En el presente trabajo se analiza la concentración de esfuerzos en una placa plana sometida a carga axial con un barreno y dos filetes, la placa es modelada en software ANSYS® en donde son obtenidos los esfuerzos máximos que soporta la placa, los cuales posteriormente son utilizados para determinar el factor de concentración de esfuerzos, a los resultados obtenidos se les aplica el método de mínimos cuadrados con el objetivo de encontrar ecuaciones polinómicas que se ajusten a los valores determinados, las ecuaciones obtenidas pueden ser utilizadas para determinar el factor de concentración de esfuerzos de la placa bajo estudio.

2. Metodología

Para determinar el factor de concentración de esfuerzos en la placa plana bajo estudio se utiliza el software ANSYS® el cual realiza sus análisis basados en el método del elemento finito. En esta sección se habla sobre algunos conceptos básicos del método de elemento finito y su aplicación en el caso de estudio.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

2.1 Nomenclatura

En la Tabla 1 se presenta la nomenclatura utilizada en el desarrollo del presente trabajo.

Tabla 1. Nomenclatura utilizada

Símbolo	Significado
A	Área de la sección transversal [m^3]
$a_{0, 1, 2...r}$	Coeficientes de la regresión polinomial
e	Error residual de K_t
F	Fuerza aplicada a la pieza [N]
k	Grado del polinomio
K_t	Factor de concentración de esfuerzos [Adimensional]
L	Longitud de la placa[m]
$N_{i...p}$	Función de forma del nodo *i, j, k, l, m, n, o, p* perteneciente al elemento cuadrado
r	Radio del filete [m]
$r2$	Radio de barreno[m]
s	Distancia entre el barreno y el filete [m]
W	Ancho mayor de la placa [m]
w	Ancho menor de la placa [m]
x	Coordenada global del elemento
y	Coordenada global del elemento
η	Coordenada local del elemento
ξ	Coordenada local del elemento
σ_{max}	Esfuerzo máximo[MPa]
σ_t	Esfuerzo nominal [MPa]

2.2 Método del elemento finito

El método del elemento finito consiste en dividir una estructura en una red de elementos geométricos simples como líneas, planos o sólidos y asociar a cada elemento ecuaciones que describan sus características físicas. El comportamiento de la estructura puede reproducirse mediante la resolución del sistema de ecuaciones resultante. En la solución del caso de estudio se utiliza un elemento cuadrado de 8 nodos como el mostrado en la Figura 1.

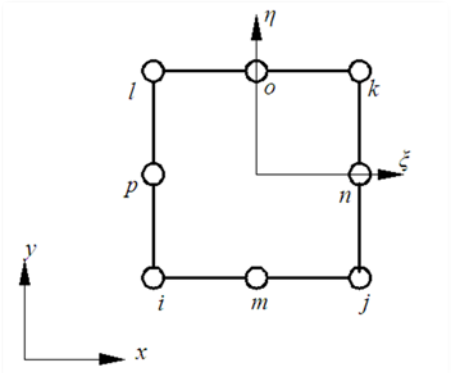


Figura 1. Esquema del elemento cuadrilátero de 8 nodos.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Las Ecuaciones (1) a (8) son las funciones de forma de los nodos del elemento de la Figura 1 en término de las coordenadas locales.

$$N_i = \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta)(-\xi-\eta-1) \quad (1)$$

$$N_j = \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta)(\xi-\eta-1) \quad (2)$$

$$N_k = \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta)(\xi+\eta-1) \quad (3)$$

$$N_l = \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta)(-\xi+\eta-1) \quad (4)$$

$$N_m = \frac{1}{2}(1-\xi^2)(1-\eta) \quad (5)$$

$$N_n = \frac{1}{2}(1+\xi)(1-\eta^2) \quad (6)$$

$$N_o = \frac{1}{2}(1-\xi^2)(1+\eta) \quad (7)$$

$$N_p = \frac{1}{2}(1-\xi)(1-\eta^2) \quad (8)$$

Las ecuaciones de forma se utilizan como punto de partida para determinar las ecuaciones que rigen el comportamiento del elemento de la Figura 1.

2.3 Caso de estudio

El caso de estudio consiste en determinar un conjunto de ecuaciones polinómicas que permitan calcular el factor de concentración de esfuerzos en una placa plana con un barreno y dos filetes la cual soporta carga axial. En la Figura 2 se muestra la pieza a analizar en el presente caso de estudio.

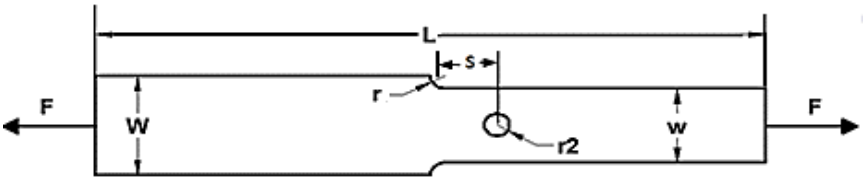


Figura 2. Pieza analizada.

A continuación presenta el modelado y desarrollo del caso de estudio planteado.

2.4 Modelado

El modelado del caso de estudio se realiza en ANSYS® en donde se utiliza un elemento cuadrilátero de ocho nodos (Solid 8 node 183), el elemento Plane 183 se utiliza porque es un cuadrilátero con nodos intermedios en las aristas, por lo que tiende a deformarse y acoplarse fácilmente durante el mallado en una sección curva. Éste elemento es configurado para trabajar como un elemento en esfuerzo plano con espesor. En la Figura 3 se muestra la pieza modelada en ANSYS®.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

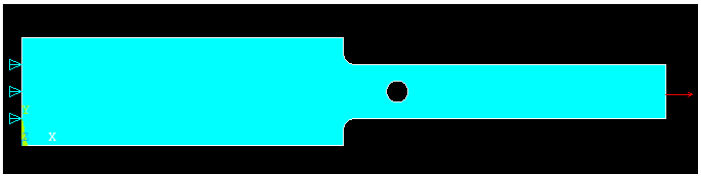


Figura 3. Modelado de la pieza.

Se realizan 70 simulaciones para determinar los esfuerzos máximos que soporta la placa, estos esfuerzos en conjunto con el esfuerzo teórico determinado mediante la Ecuación (9) se utilizan para calcular el factor de concentración de esfuerzos por la Ecuación (10).

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \tag{9}$$

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_t} \tag{10}$$

Para resolver el caso de estudio se considera que el material de la pieza es acero al bajo carbón, modulo elástico de 210 GPa, razón de Poisson de 0.28. Los modelos soportan una carga a tensión del 100 kN en uno de sus extremos, en el otro extremo es restringido en la dirección de x. Las condiciones y parámetros bajo las cuales se realizan las simulaciones son mostradas en la Tabla 2, en todos los casos de estudio el espesor de la placa se considera de 0.01 m, *L* tiene un valor constante de 0.6 m, *s* es constante con un valor de 0.05 m y la fuerza *F* es de 100 kN.

Tabla 2. Parámetros y condiciones para realizar las simulaciones

Caso	*W/w*	*W*	w	Rango de variación de r			Rango de variación de r2			Número de simulaciones
				Inicio	Final	Paso	Inicio	Final	Paso	
1	1.2	0.06	0.05	0.0012	0.0038	0.0002	0.002	0.015	0.001	14
2	1.5	0.075	0.05	0.001	0.011	0.001	0.001	0.006	0.0005	11
3	2.0	0.10	0.05	0.001	0.015	0.001	0.001	0.015	0.001	15
4	2.5	0.125	0.05	0.001	0.015	0.001	0.001	0.015	0.001	15
5	3.0	0.15	0.05	0.001	0.015	0.001	0.001	0.015	0.001	15

2.5 Regresión polinomial por el método de mínimos cuadrados

El método de mínimos cuadrados es utilizado para realizar una regresión polinomial con el fin de ajustar los valores obtenidos para K_t y la relación *r/s* a un conjunto de ecuaciones polinomiales, el procedimiento utilizado se muestra a continuación. Se tiene un conjunto de *n* pares de resultados [(r/s_i, K_{ti}); $i = 1, 2, \ldots, n$], cada resultado de K_{ti} satisface la Ecuación (11)

$$K_{ti} = a_0 + a_1\left(\frac{r}{s}\right)_i + a_2\left(\frac{r}{s}\right)_i^2 + \ldots + a_k\left(\frac{r}{s}\right)_i^k + e_i \tag{11}$$

La Ecuación (11) genera un conjunto de ecuaciones normales, las cuales para este caso son mostradas en el conjunto de Ecuaciones (12).

$$\begin{aligned}
na_0 &+ a_1\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r}{s}\right)_i + a_2\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r}{s}\right)_i^2 + \ldots + a_k\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r}{s}\right)_i^k = \sum_{i=1}^{n}K_{ti} \\
a_0\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r}{s}\right)_i &+ a_1\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r}{s}\right)_i^2 + a_2\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r}{s}\right)_i^3 + \ldots + a_k\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r}{s}\right)_i^{k+1} = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r}{s}\right)_i K_{ti} \\
&\vdots \qquad\quad \vdots \qquad\quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \qquad \vdots \\
a_0\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r}{s}\right)_i^k &+ a_1\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r}{s}\right)_i^{k+1} + a_2\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r}{s}\right)_i^{k+2} + \ldots + a_k\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r}{s}\right)_i^{2k} = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r}{s}\right)_i^k K_{ti}
\end{aligned} \tag{12}$$

Las Ecuaciones (12) generan el sistema matricial mostrado en la Ecuación (13).

$$\begin{bmatrix}
n & \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r}{s}\right)_i & \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r}{s}\right)_i^2 & \cdots & \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r}{s}\right)_i^k \\
\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r}{s}\right)_i & \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r}{s}\right)_i^2 & \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r}{s}\right)_i^3 & \cdots & \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r}{s}\right)_i^{k+1} \\
\vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\
\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r}{s}\right)_i^k & \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r}{s}\right)_i^{k+1} & \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r}{s}\right)_i^{k+2} & \cdots & \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r}{s}\right)_i^{2k}
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} =
\begin{bmatrix}
\sum_{i=1}^{n}K_{ti} \\
\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r}{s}\right)_i K_{ti} \\
\vdots \\
\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r}{s}\right)_i^r K_{ti}
\end{bmatrix} \tag{13}$$

El sistema matricial representado en la Ecuación (13) se resuelve para obtener los valores de los coeficientes a_0, a_1, a_2,…a_k, los cuales posteriormente se sustituyen en la Ecuación (14) y de esta forma se determinan las ecuaciones polinomiales por el método de los mínimos cuadrados, la cuales permiten ajustar los resultados obtenidos a ecuaciones que permiten estimar el valor del factor de concentración de esfuerzos.

$$K_{ti} = a_0 + a_1\left(\frac{r}{s}\right)_i + a_2\left(\frac{r}{s}\right)_i^2 + \ldots + a_k\left(\frac{r}{s}\right)_i^k \tag{14}$$

Las Ecuaciones (11) a (14) es el conjunto de ecuaciones que posteriormente se utilizan para determinar las Ecuaciones (15) a (24).

3. Resultados

Los resultados obtenidos son mostrados gráficamente en las Figuras 4 y 5. La Figura 4 presenta la distribución del factor de concentración de esfuerzos en el barreno de la placa analizada para las relaciones *W/w* = 1.2, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0.

Las Ecuaciones que describen el comportamiento de las curvas mostrada en la Figura 4 son determinadas por las Ecuaciones (15) a (19). Las cuales son obtenidas aplicando el procedimiento descrito por las Ecuaciones (11) a (14).

La Ecuación (15) se determina utilizando un valor de *k* igual a 2, para la Ecuación (16) el valor de *k* utilizado es de 5, un valor *k* igual a 3 es utilizado para determinar las Ecuaciones (17) y (18) y finalmente la Ecuación (19) se calcula con un valor de *k* igual a 6.

La ecuación que describe el comportamiento para *W/w* = 1.2 con un R^2 = 0.99 es mostrada en la Ecuación (15).

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

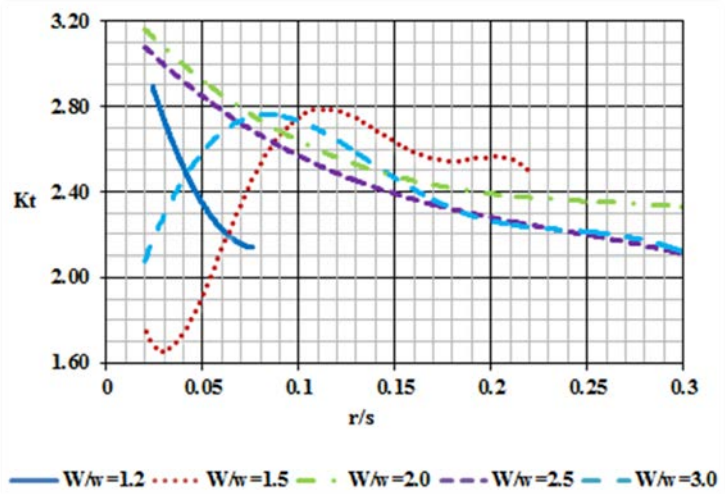


Figura 4. Factor de concentración de esfuerzos en el barreno de la placa analizada.

$$K_t = 251.86\left(\frac{r}{s}\right)^2 - 39.701\left(\frac{r}{s}\right) + 3.7 \quad (15)$$

La ecuación que describe el comportamiento para *W/w* = 1.5 con un R^2 = 0.97 es mostrada en la Ecuación (16).

$$K_t = -160636\left(\frac{r}{s}\right)^5 + 104886\left(\frac{r}{s}\right)^4 - 24979\left(\frac{r}{s}\right)^3 + 2553.7\left(\frac{r}{s}\right)^2 - 94.805\left(\frac{r}{s}\right) + 2.7986 \quad (16)$$

La ecuación que describe el comportamiento para *W/w* = 2.0 con un R^2 = 0.99 es mostrada en la Ecuación (17).

$$K_t = -46.554\left(\frac{r}{s}\right)^3 + 37.458\left(\frac{r}{s}\right)^2 - 10.465\left(\frac{r}{s}\right) + 3.3579 \quad (17)$$

La ecuación que describe el comportamiento para *W/w* = 2.5 con un R^2 = 0.98 es mostrada en la Ecuación (18).

. $$K_t = -48.474\left(\frac{r}{s}\right)^3 + 35.007\left(\frac{r}{s}\right)^2 - 9.9963\left(\frac{r}{s}\right) + 3.266 \quad (18)$$

La ecuación que describe el comportamiento para *W/w* = 3.0 con un R^2 = 0.97 es mostrada en la Ecuación (19).

$$K_t = 43163\left(\frac{r}{s}\right)^6 - 42274\left(\frac{r}{s}\right)^5 + 13994\left(\frac{r}{s}\right)^4 - 1381.2\left(\frac{r}{s}\right)^3 - 147.96\left(\frac{r}{s}\right)^2 + 30.342\left(\frac{r}{s}\right) + 1.54 \quad (19)$$

La Figura 5 presenta la distribución del factor de concentración de esfuerzos en el filete de la placa analizada para las relaciones *W/w* = 1.2, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0.

Las Ecuaciones que describen el comportamiento de las curvas mostrada en la Figura 5 son determinadas por las Ecuaciones (20) a (24). Las cuales son obtenidas aplicando el procedimiento descrito por las Ecuaciones (11) a (14).

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

La Ecuación (20) se determina utilizando un valor de *k* igual a 2, para la Ecuación (21) el valor de *k* utilizado es de 5, un valor *k* igual a 3 es utilizado para determinar las Ecuaciones (22) y (23) y finalmente la Ecuación (24) se calcula con un valor de *k* igual a 6.

La ecuación que describe el comportamiento para *W/w* = 1.2 con un R^2 = 0.97 es mostrada en la Ecuación (20).

$$K_t = 1x10^9\left(\frac{r}{s}\right)^6 - 4x10^8\left(\frac{r}{s}\right)^5 + 5x10^7\left(\frac{r}{s}\right)^4 - 3x10^6\left(\frac{r}{s}\right)^3 + 104864\left(\frac{r}{s}\right)^2 - 1915\left(\frac{r}{s}\right) + 16.44 \quad (20)$$

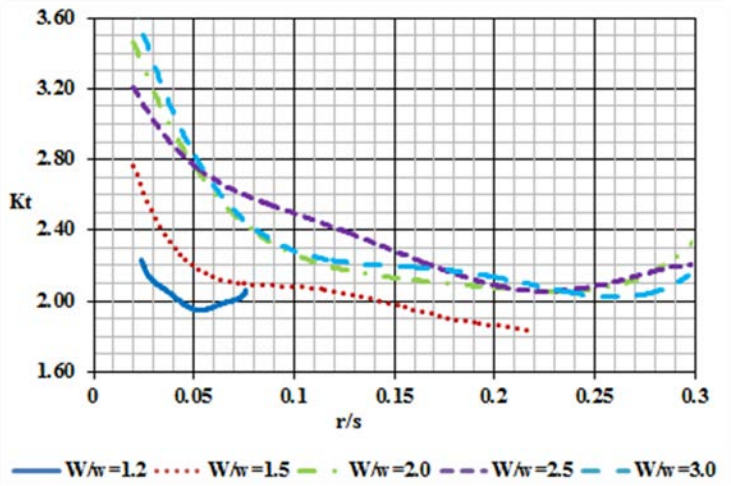


Figura 5. Factor de concentración de esfuerzos en el filete de la placa analizada.

La ecuación que describe el comportamiento para *W/w* = 1.5 con un R^2 = 0.98 es mostrada en la Ecuación (21).

$$K_t = -39803\left(\frac{r}{s}\right)^5 + 29364\left(\frac{r}{s}\right)^4 - 8246.2\left(\frac{r}{s}\right)^3 + 1088.6\left(\frac{r}{s}\right)^2 - 68.623\left(\frac{r}{s}\right) + 3.7653 \quad (21)$$

La ecuación que describe el comportamiento para *W/w* = 2.0 con un R^2 = 0.99 es mostrada en la Ecuación (22).

$$K_t = 1754.6\left(\frac{r}{s}\right)^4 - 1266.4\left(\frac{r}{s}\right)^3 + 344.05\left(\frac{r}{s}\right)^2 - 42.783\left(\frac{r}{s}\right) + 4.1928 \quad (22)$$

La ecuación que describe el comportamiento para *W/w* = 2.5 con un R^2 = 0.98 es mostrada en la Ecuación (23).

$$K_t = -11755\left(\frac{r}{s}\right)^5 + 10233\left(\frac{r}{s}\right)^4 - 3262.5\left(\frac{r}{s}\right)^3 + 483.4\left(\frac{r}{s}\right)^2 - 37.773\left(\frac{r}{s}\right) + 3.796 \quad (23)$$

La ecuación que describe el comportamiento para *W/w* = 3.0 con un R^2 = 0.99 es mostrada en la Ecuación (24).

$$K_t = 2416.1\left(\frac{r}{s}\right)^4 - 1783.1\left(\frac{r}{s}\right)^3 + 475.29\left(\frac{r}{s}\right)^2 - 55.516\left(\frac{r}{s}\right) + 4.6255 \quad (24)$$

Las Ecuaciones (15) a (19) permiten determinar el factor de concentración de esfuerzos en el barreno, mientras que las Ecuaciones (10) a (24) permiten determinar el factor de concentración de esfuerzos en el filete de la placa analizada.

4. Conclusiones

En las Figuras 4 y 5 se observa que el factor de concentración de esfuerzos siempre es más grande en el barreno que en el filete, esto se debe a un cambio más drástico de las líneas de esfuerzos que se presentan en la placa del caso de estudio analizado, por tanto, es conveniente poner especial atención en los esfuerzos que soporta la periferia de los barrenos debido a que en estos es donde se puede presentar una falla si no se tiene cuidado al momento de diseñar piezas mecánicas con este tipo de concentradores de esfuerzos.

Las ecuaciones polinómicas encontradas en el desarrollo del presente caso de estudio se pueden utilizar para determinar el factor de concentración de esfuerzos tanto en los barrenos como en los filetes de una placa plana sujeta a las condiciones geométricas y de carga presentadas en el caso de estudio analizado, esto debido a que su factor de correlación R^2 varía entre 0.97 y 0.99 por lo cual el valor que se obtenga del factor de concentración de esfuerzos se ajusta fuertemente a los datos experimentales obtenidos mediante las simulaciones realizadas.

Referencias

[1] Monroy H. y Godoy L., *"Un sistema computacional para la simulación de interacción de defectos estructurales", Mecánica Computacional,* Vol. XXV, pp. 1-9, 2006
[2] Roldan F. y Bastidas U., *"Estudio experimental y por análisis de elementos finitos del factor de concentrador de esfuerzo producido por un agujero en una placa plana", Dyna*, Vol. 69, Núm. 137, pp. 1-8, 2002.
[3] Maíz S., Rossi R., Laura P. y Bambill D., *"Efectos de la ortotropía sobre el factor de concentración de tensiones: extensión del problema de kirsch", Mecánica Computacional*, Vol. XXIII, pp. 673-692, 2004.
[4] Bambill D., Susca A., Laura P. y Maíz S., *"Concentración de tensiones en placa ortótropa sometida a esfuerzo biaxial, Mecánica Computacional",* Vol. XXIV, pp.2675-2694, 2005.
[5] Martínez J., Carrera J. y Ferrer L., *"Análisis experimental y numérico de esfuerzos en placas con orificio circular bajo el gradiente de carga lineal", Ingeniería Mecánica, Tecnología y Desarrollo*, Vol. 2, Núm. 2, 2006.
[6] Méndez J. y Torres J., *"Concentración de esfuerzo en una placa de material ortotrópico con una abertura elíptica"*, Congreso Iberoamericano de metalurgia y materiales, Habana Cuba, 2006.
[7] Sánchez M., *"Factor teórico de concentración de esfuerzos en placas anisotrópicas",* Departamento de Ingeniería Mecánica, UNEXPO Vicerrectorado Puerto Ordaz, Venezuela, 2006.
[8] Domínguez P., Santos R., Robles S. y Ortega N., *"Concentración de tensiones en piezas de materiales compuestos", Mecánica Computacional*, Vol. XXV, pp. 537-548, 2006.
[9] Susca A., Bambill D., Laura P. y Rossi R., *"Factor de concentración de tensiones en el entorno de un orificio rectangular presente en una placa ortótropa", Mecánica Computacional,* Vol. XXV, pp. 411-427, 2006.
[10] Susca A., Bambill D., Rossi R, *"Análisis de la concentración de tensiones en placas ortótropas con orificio circular sometidas simultáneamente a cargas normales y tangenciales", Mecánica Computacional,* Vol. XXVI, pp. 386-405, 2007.
[11] Peñaranda M., Pedroza J. y Méndez J., *"Determinación del factor teórico de concentración de esfuerzo de una placa infinita con doble agujero"*, 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Cusco Perú, 2007.

[12] Osorio A., Rodríguez D., Gámez B., Ojeda D., *"Análisis numérico de una placa para fijación de fracturas de radio distal utilizando el método de elementos finitos", Ingeniería UC,* Vol. 17, Núm. 1, pp. 28-36, 2010.

[13] Nagpal S., Sanyal S., y Jain N., *"Analysis and mitigation of stress concentration factor of a rectangular isotropic and orthotropic plate with central circular hole subjected to in-plane static loading by design optimization", International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology,* Vol. 2, Issue 6, pp. 2903-2913, IJIRSET, 2013.

[14] Mohan M., Rajest S., Yogesh H. y Yeshaswini B., *"Study on the effect of stress concetration on cutout orientation of plates with various cutouts and bluntness", International Journal of Modern Engineering Research*, Vol. 3, Issue 3, pp. 1295-1303, 2013.

[15] Louhghalam A., Igusa T., Park C., Choi S., y Kim K., *"Analysis of stress concentrations in plates with rectangular openings by a combined conformal mapping – Finite element approach", International Journal of Solids and Structures,* Vol. 48, pp 1991-2004, 2011.

[16] Noda N. y Takase Y., *"Stress concentration formula useful for all notch shape in a round bar (comparison between torsion, tension and bending)", International Journal of Fatigue,* Vol. 28, pp. 151-163, 2006.

[17] Henrique S., Tácito A. y Moreno M., *"Stress concentration factor calculation for a notched specimen under elasto-plastic loading"*, 22nd International Congress of Mechanical Engineering, pp. 7761-7769, 2013.

[18] Dharmin P., Khushbu P. y Chetan J., *"A Review on Stress Analysis of an Infinite Plate with Cut-outs", International Journal of Scientific and Research Publications,* Vol. 2, Issue 11, pp. 1-7, 2012.

[19] Ortega F., Garcia J., Rocha G. y Guzman A., *"Análisis de esfuerzos en placas planas sometidas a carga axial"*, Memorias del XIX Congreso Internacional Anual de la SOMIM, 25 Al 27 De Septiembre, 2013 Pachuca, Hidalgo, México

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

17. Manipulación de una válvula de control de manera remota

Delgado Arcega Rodrigo Oliver, Gómez Becerra Fabio Abel, Robles Julio Cesar

rodrigo_oliver7@hotmail.com;

Instituto Tecnológico de Puerto Vallarta.

Resumen.

En el presente trabajo, explica como una interface propuesta la cual monitorea y controla el flujo entre los tanques del "Laboratorio de procesos industriales RT-590", por medio de un controlador industrial ABB PROTRONIC 500. El diseño del sistema de control y monitoreo, presenta un ambiente gráfico y amigable para el operador, con la capacidad de monitorear y manipular las variables físicas que intervienen en el proceso. La interfaz propuesta es montada en un servidor ThighVNC, el cual permite entrar a la interface usando internet. El trabajo abarca los siguientes aspectos: educación, control, comunicación y la interfaz. Se presentan algunos resultados obtenidos en el acceso de control del flujo del líquido.

1. Introducción.

En los últimos años los laboratorios de prácticas han tomado gran importancia, ya que en ellos, no solo comprueban una teoría, ley o concepto [1], sirve también para entrenar futuros profesionistas en condiciones similares a las que se van a topar cuando se enfrenten al sector laboral, además que auxilian como herramienta de apoyo en la elaboración de tesis [2]. En muchas ocasiones, los laboratorios abonan al prestigio de universidad o del instituto en cuestión.

Este documento explica la propuesta de un laboratorio de prácticas remotas, esta propuesta no solo ataca el eterno problema de los centros educativos de infraestructura [3], espacios y disponibilidad, sino que también permiten la apertura de las carreras de ingenierías a distancia o no presenciales [4], esto con la ayuda de internet.

El laboratorio de Procesos Industriales RT-590, es un laboratorio en el cual se pueden realizar experimentos para el control de temperatura, control de nivel, control de presión y control de flujo entre tanques [5]. Para este último se realizó una interface basada en LabVIEW, la cual con la ayuda de los módulos de SCADA, se genera un vínculo entre el controlador ABB PROCTRONIC 500 y una PC.

El Sistema de Entrenamiento de Control de Procesos RT-590 abarca, en total, cuatro distintos bucles cerrados de control, además cuenta con controladores locales [5]. Estos se pueden activar individualmente o de manera simultánea, por medio de un panel de servicio separado. Es posible simular algunos fallos, como el escalar la variable de referencia en controlador 2, 3 y 4, dentro de la simulación de fallos se puede generar indicación errónea de variable controlada en los 4 controladores. Los sensores y las válvulas trabajan con señales en un rango de corriente de 4 a 20 mA. La alimentación de energía de la bomba es constante y su accionamiento es manual [4].

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

En la siguiente sección se describen detalladamente los componentes del laboratorio industrial de procesos industriales RT-590, que intervienen en el experimento de flujo, así como sus capacidades [4].

1.1 Módulo de procesos

El módulo de procesos, contiene los equipos que forman parte de los lazos de control, elementos de control: actuadores y sensores de medición de flujo, nivel, presión y temperatura. La figura 1 muestra el sistema de flujo implementado con sus componentes: dos válvulas de control, un sensor de flujo, la bomba y los tanques. Los sensores y las válvulas trabajan con señales de corriente de 4 a 20 mA. La alimentación de energía de la bomba es constante y su accionamiento es manual [5].

El sistema de flujo que se desea controlar consta de una entrada que se manipula (actuador) y de una salida que responde a los cambios a dicha entrada.

1.2 Controlador ABB PROTRONIC 500

El controlador recibe las señales de los sensores, y se emiten las órdenes para que trabajen los actuadores (puertos analógicos del controlador). El controlador se puede emplear de manera flexible. La operación del controlador se manipula a través de un menú operado por teclas, es sencillo y confortable. Todos los ajustes y variables de control se visualizan en una pantalla. Los parámetros de control poseen amplios límites de ajuste. De esta manera, el controlador se puede adaptar a varias tareas de control [6]. El ajuste digital permite una parametrización precisa y reproducible. El controlador cuenta con terminales básicas, un módulo de comunicación PROFIBUS y un puerto de salidas analógicas de corriente [7]. El controlador puede ser gobernado de manera no presencial, esta opción se conoce como mando remoto [8]. En el módulo de control de flujo, la bomba transporta el agua, pasando a través de FCV2 (Figura 1), hacia el depósito V2. Desde aquí, el agua fluye a través de la tubería de retorno y de HV5, de regreso a V1.

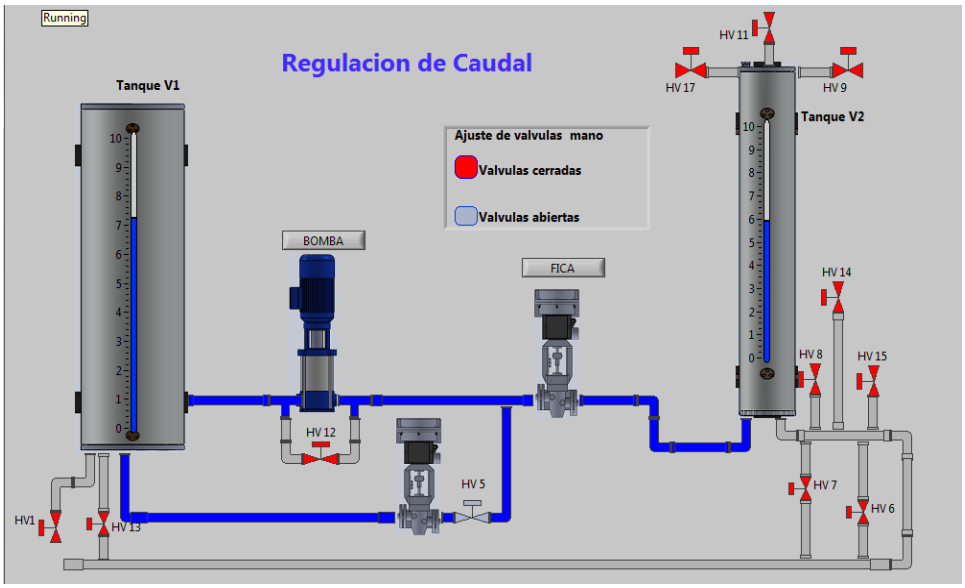


Figura 1. Interfaz gráfica del Laboratorio industrial RT-590.

Las válvulas FCV1, para el retorno directo a V1, y FCV2 para el flujo propiamente dicho se activan en sentido opuesto. Durante los experimentos se debe observar que el nivel de fluido de V2 sea igual o mayor al de V1. Para el control automático se emplea el controlador 3 (FICA) del panel. De la misma manera que en el módulo de presión, el controlador PROTRONIC 500 para flujo (FICA) tiene la opción

de configurarlo como P, PI, PID o PD, según lo desee el usuario. También, es posible modificar sus tiempos de operación para ver el comportamiento de una variable (controlada) o de la variable manipulada.

En este experimento, los depósitos V1 y V2 se llenan hasta un nivel de aproximadamente 500mm, el controlador se configura como PI, con los siguientes parámetros de ajuste: $K_p = .5$, $T_n = 0.003$, $T_v = 0$.

Comunicación Protronic/Ordenador.

Como primer paso para el diseño de la interfaz, se hizo funcionar el equipo con los controladores PROCTRONIC conectados, enlazando y manipulando directamente con una PC, por medio de una tarjeta PCI/Profibus. Esto implica poder comunicarse entre LabVIEW y el controlador PROCTRONIC por medio de algún protocolo de comunicación, como lo es MODBUS-PROFIBUS.

La comunicación del controlador de la planta con el medio exterior se logra gracias al empleo del protocolo PROFIBUS, ver figura 2.

Para lograrlo se cambió la tarjeta de adquisición (CIF-50-PB) de la PC del ITS-PV, la cual controlaba el módulo de procesos RT-590 a través de un CPU particular. Después se comprobó que el cambio funcionaba, realizando el experimento de control de presión de un tanque hidroneumático.

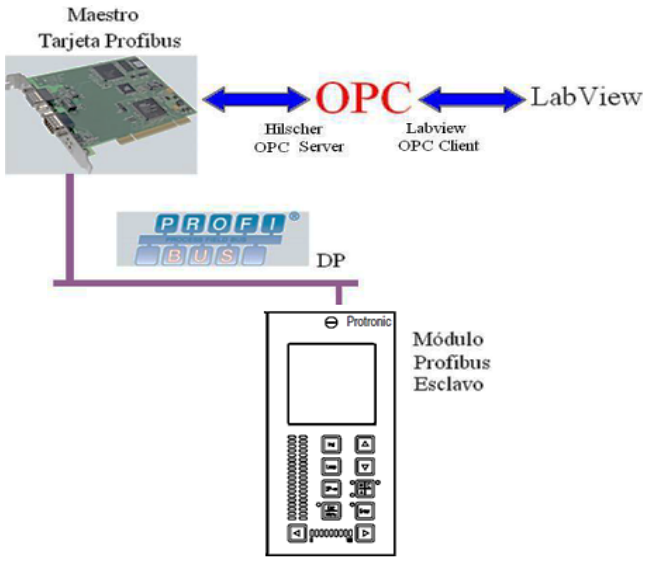


Figura 2. Tarjeta Hilscher PCI/ PROFIBUS(CIF-50-PB).

2. Dispositivos de interfaz. Hardware de comunicación.

La interfaz para manipular las válvulas en los multi-lazos de control, dentro del módulo de procesos en conjunto con el módulo de control, se diseñó en LabVIEW. Este software contiene un entorno de programación gráfica, bibliotecas integradas y específicas para ingeniería, herramientas para análisis, y también permite visualizar variables medidas y compartir datos [9].

Toda la instrumentación del laboratorio industrial de procesos RT-590, se conecta a dos reguladores, denominados PROTRONIC 500 de la marca ABB. Estos dispositivos son controladores y

cuentan con abanicos de aplicaciones ilimitadas en diferentes campos industriales como lo son: ingeniería mecánica, de plásticos, textiles, azúcar, cerámicas, industria cementera, ambiente de protección y laboratorios e instituciones tecnológicas [10].

Es importante conocer y saber cómo usar estos reguladores porque se requiere modificarlos a través del protocolo de comunicación PROFIBUS para la conexión de sistemas de alto nivel. De esta manera se tienen más posibilidades de manipular y adquirir datos del sistema: A través del protocolo se cuenta con entrada universal para el control de variables (mA, termo-resistencias, de temperatura, etc.), con rangos de medición configurables, salidas de relevador y acciones de control PID, PI, PD y P [11].

En esta sección se describe el hardware necesario para construir la interfaz, haciendo énfasis en los dispositivos para conectar los controladores y el ordenador en el cual estará instalada la interfaz hombre-máquina. Igualmente se explicará el procedimiento de configuración de los dispositivos usados. La tarjeta Hilscher, se adaptó en los conectores PCI del PC. La CIF 50-PB es la interfaz de comunicación que se encarga del intercambio de datos entre los dispositivos conectados de bus de campo y el PC (ver figura 3). El intercambio de mensajes de datos orientados se maneja a través de un buzón en la memoria de doble puerto. Para nuestras pruebas se utilizó el puerto DB-9 hembra, el cual requiere de un estándar de conexión RS-485 [12].

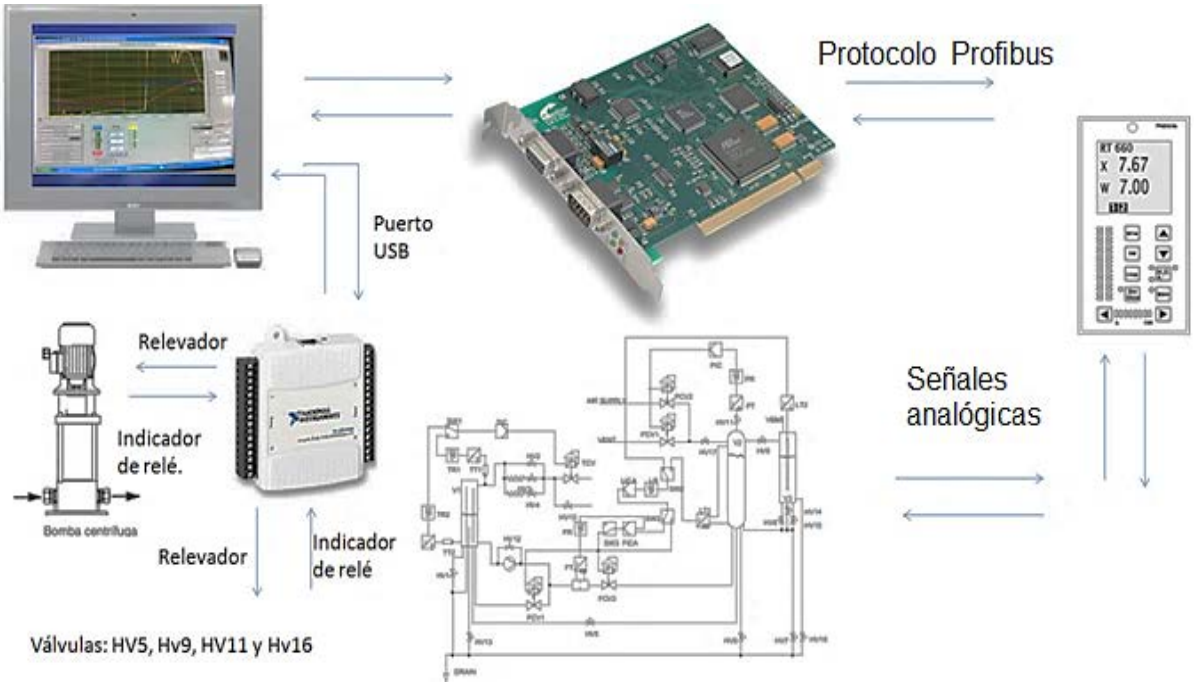


Figura 3. Esquema de conexión.

La configuración se llevó a cabo a través del software SyCon (ver figura 4), el cual es considerado como un OPC server. La comunicación se hace a través del controlador de dispositivo o CIF, a través de TCP / IP a un PC a distancia o a través de una conexión en serie entre el puerto COM de la PC y la interfaz de diagnóstico de la CIF, ver figura 4.

Para configurar un controlador como esclavo se asignó una dirección de red, que coincide con la dirección configurada en el instrumento, ver figura 4. En seguida se asignan paquetes dentro de los cuales va a transportarse la información. Por lo tanto enlistamos que señales del controlador queremos transportar a través de la red [13].

Para transportar las variables de lectura se escogieron paquetes de 32 palabras; Adicional a esto, se seleccionaron los paquetes “Azykl Write Bytes” y “Azykl Read Bytes” para transmitir los parámetros online, los cuales son bloques de registros que se encuentran dentro del controlador.

Mediante la lista **Parameter Data** se especificaron las direcciones físicas de las señales que se querían transportar y que fueron llenando los paquetes anteriormente definidos. Las direcciones se anotaron en dos partes, comenzando con la parte menos significativa. Los cuatro primeros bytes de esta lista están reservados y no se pueden ocupar.

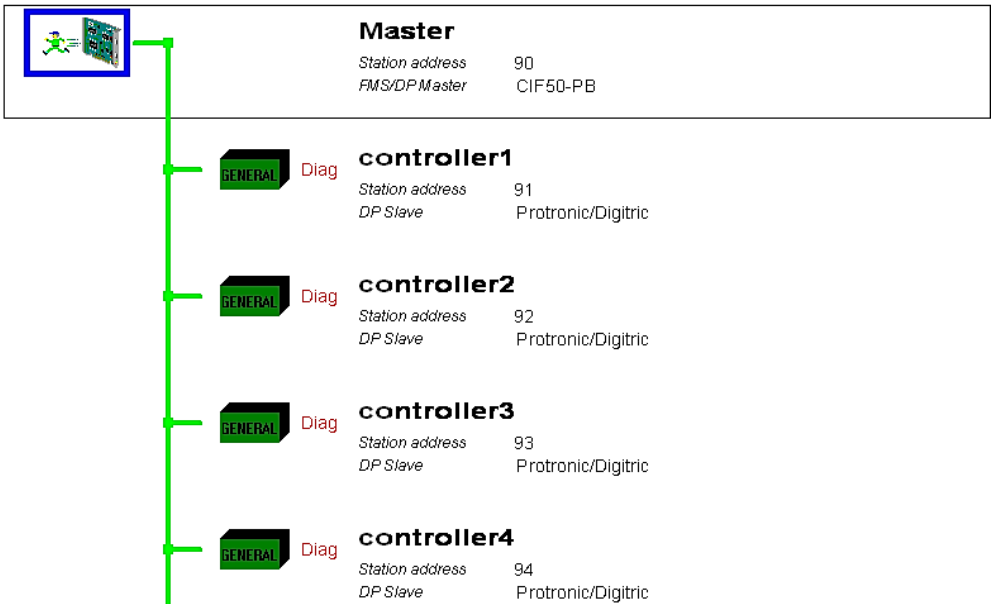


Figura 4. Configuración de controladores.

El siguiente paso fue asignar un nombre a cada bit o conjunto de bits que representa información, ver figura 5. Estas definiciones serán las que constituyan a las variables OPC.

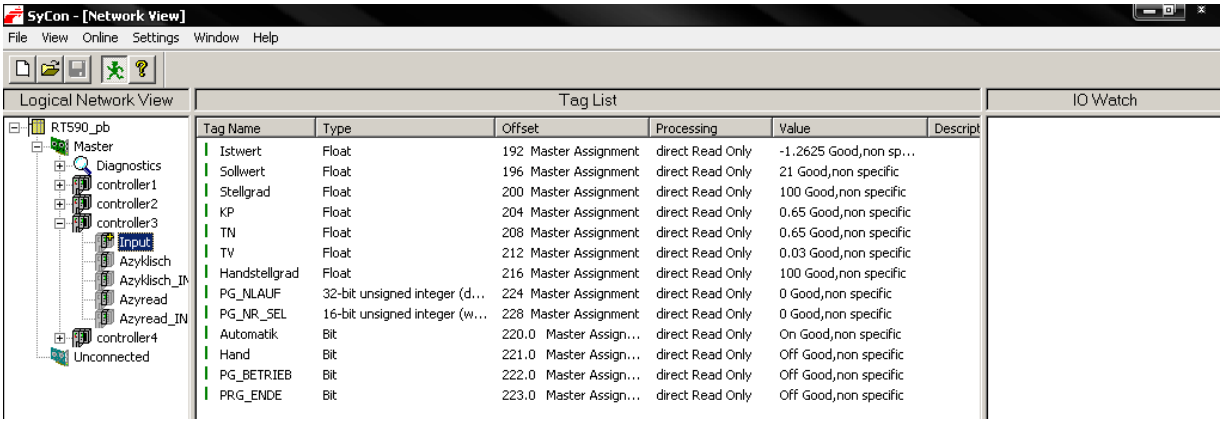


Figura 5. Ventana de asignación de los valores dentro del Protronic 500.

Una vez definido el esclavo, sus paquetes y la lista de parámetros, en la ventana logical network view se muestran estas configuraciones. Para acceder a cada paquete, se asignan los nombres de las señales tomando en cuenta el tipo de dato y la cantidad de bits que utilizan para su representación.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Los bits viajan a través de la red, empaquetados en grupos de 8 bits, por tanto cada información booleana reserva 8 bits ocupando solo el primero.

Para la escritura de datos online (los parámetros del controlador PID), es necesaria la comunicación acíclica, la cual se puede llevar a cabo mediante la versión DPV1 de Profibus, o en su defecto se pueden usar paquetes especialmente diseñados para comunicación acíclica. Este es el caso de los paquetes o módulos “Azykl read” y “Azykl write”, los cuales se usan para escribir los valores de las señales de los parámetros del PID.

La escritura en los registros del controlador se consiguió a través del módulo Azykl write, el cual requiere de 8 bytes para el pedido y 6 bytes para dar respuesta. Los telegramas que se transportan son los indicados en las siguientes tablas:

Tabla 1. Telegrama de lectura.

Byte 0	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7
		Word 1					
Service = 0x10	Polling number	Variable index		1 to 4 data byte			
Service = 0x10	Polling number	Variable index Lowbyte	Variable Index Hibyte	1 to 4 data byte			

Tabla 2. Telegrama de escritura

Byte 0	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5
		Word 1			
Service = 0x10	Polling number	Variable index		Status	Error
Service = 0x10	Polling number	Variable index Low	Variable Index Hi	Status	Error

El byte servicio debe tener el valor 16 (0x10 en Hexadecimal) para poder habilitar la comunicación. El dato solo se escribirá cada vez que cambie el valor de Polling number. La dirección sobre la que se quiere escribir se la especifica mediante Variable index. Por último el valor se transmite por medio de 4 bytes. La configuración del paquete AzyklWrite en la ventana de Logical Network View queda como lo indica la figura 5.

2.1 Configuración de la interfaz hombre-máquina para el módulo de control de flujo.

El panel frontal de la interfaz del usuario (a nivel software), permite monitorear el trabajo que realiza el controlador PROTRONIC 500. A través de este, es posible cambiar los parámetros PID. Para el diseño de la carátula de la interfaz se establece un enlace entre la red y LabVIEW, lo que implica declarar a LabVIEW como OPC cliente. El OPC server es el driver de la tarjeta Profibus, cuyas variables han sido ya configuradas mediante el software SyCon. Creando un nuevo proyecto, podemos agregar un nuevo I/O Server de tipo OPC cliente, ver figura 6.

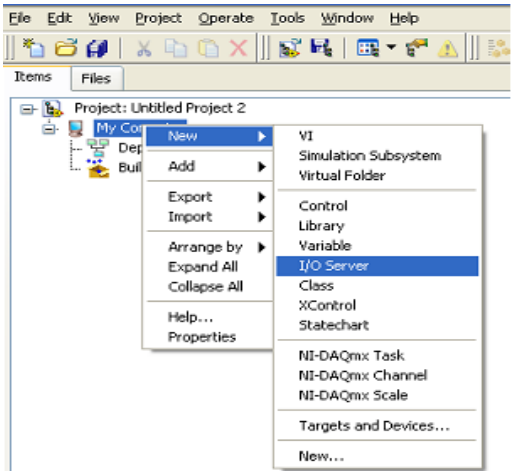


Figura 6. Elección en modo servidor para generar variables en LabVIEW.

En la figura 7 se muestra la selección del servidor OPC, así como el tiempo en que LabVIEW actualizará las señales del controlador.

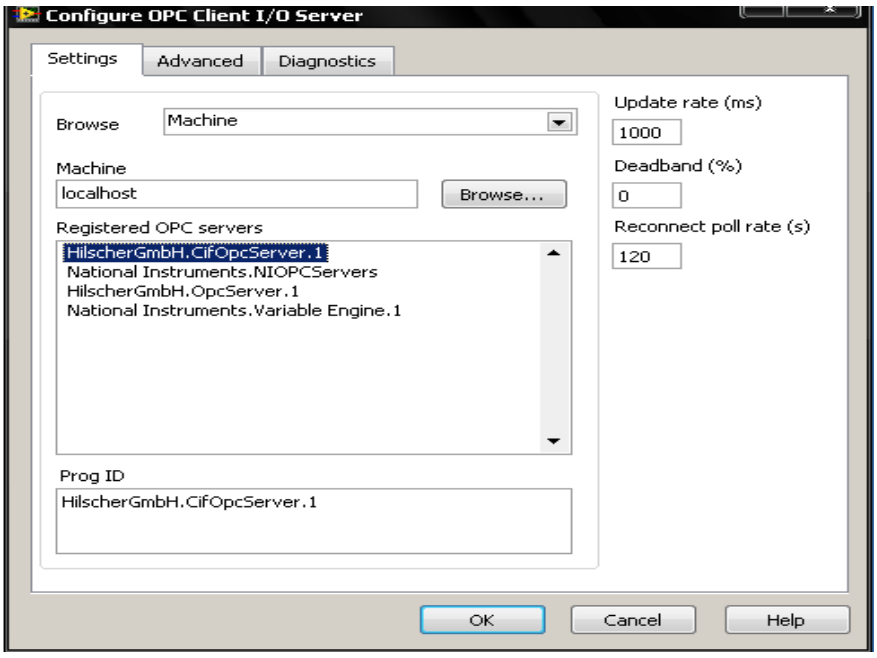


Figura 5. Elección del servidor OPC.

A continuación en la figura 7 se muestra como se genera la librería en donde se alojan las variables enlazadas a la red (bound variables) con LabVIEW.

Las variables que se monitorean (entradas) se arrastran al diagrama de bloques, mientras que las que se manipulan (salidas) se arrastran al panel frontal.

Se pueden configurar las propiedades de las variables, como su formato de representación, escalamiento, etc.

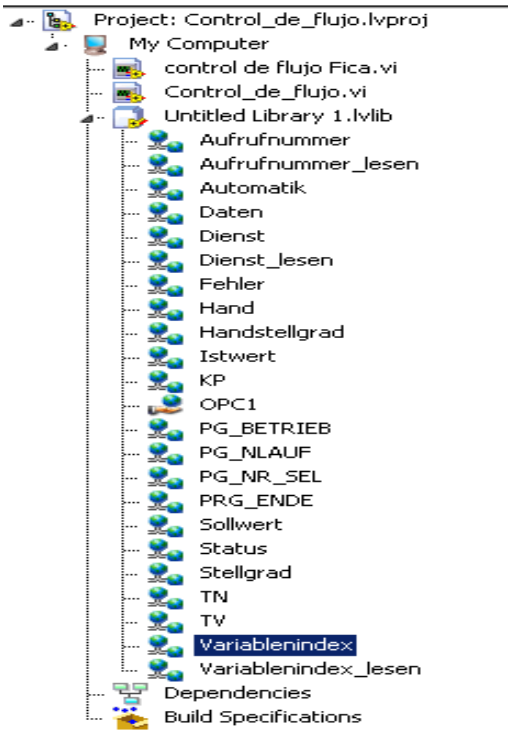


Figura 6.Variables generadas para el control de flujo.

El panel frontal que se muestra en la figura 8 es la interfaz de usuario que resulta de este trabajo, y que ha sido diseñada en particular para llevar a cabo el experimento de control de flujo. Nos permite observar en un gráfico, las señales del punto de ajuste (set point), la variable del proceso y la salida del controlador.

En la parte “Parametros Online” podemos cambiar el valor de las señales de las válvulas, parámetros PID o el Set point. También hay indicadores que se activan al existir una ausencia de señal en las entradas o salidas del controlador. Por último se comenta que el controlador se queda operando en modo automático.

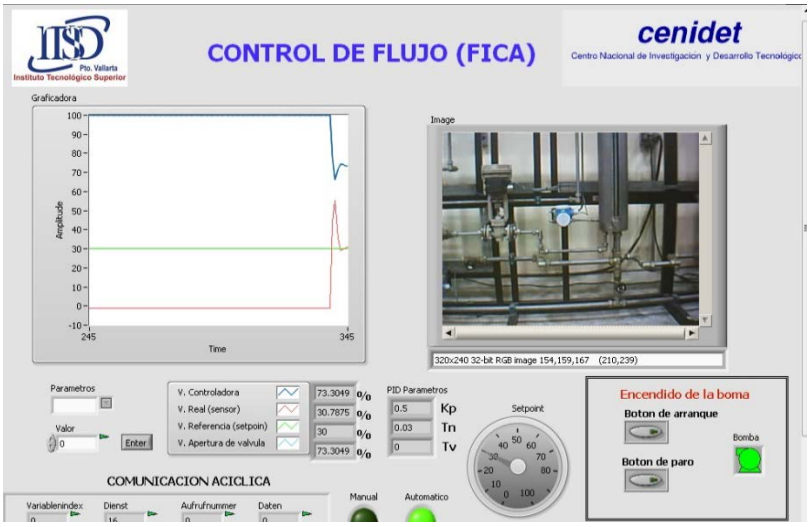


Figura 9. Panel frontal del experimento de control de caudal.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

El diagrama de bloques (ver figura 10) está formado por un lazo while, dentro del cual están las variables de lectura con su respectivo indicador.Para la comunicación acíclica, se programó cada variable a escribir, seleccionada a través del combo box, correspondiendo a la dirección física de esa variable, de tal manera que cuando se presione la tecla [ENTER] el “polling number” aumenta en uno cambiando su valor y por tanto ejecutando la escritura sobre la dirección física correspondiente a la variable especificada en el combo box, ver figura 11.

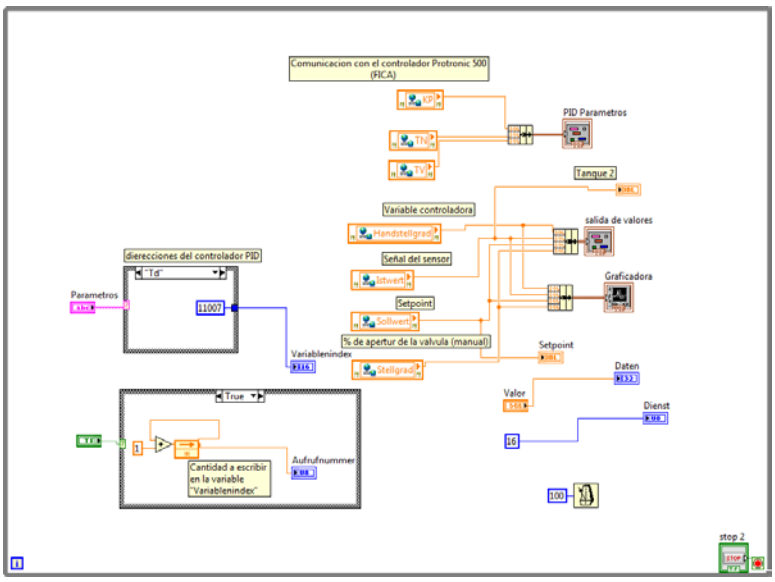


Figura 10. Diagrama de bloques correspondientes al experimento de control de caudal.

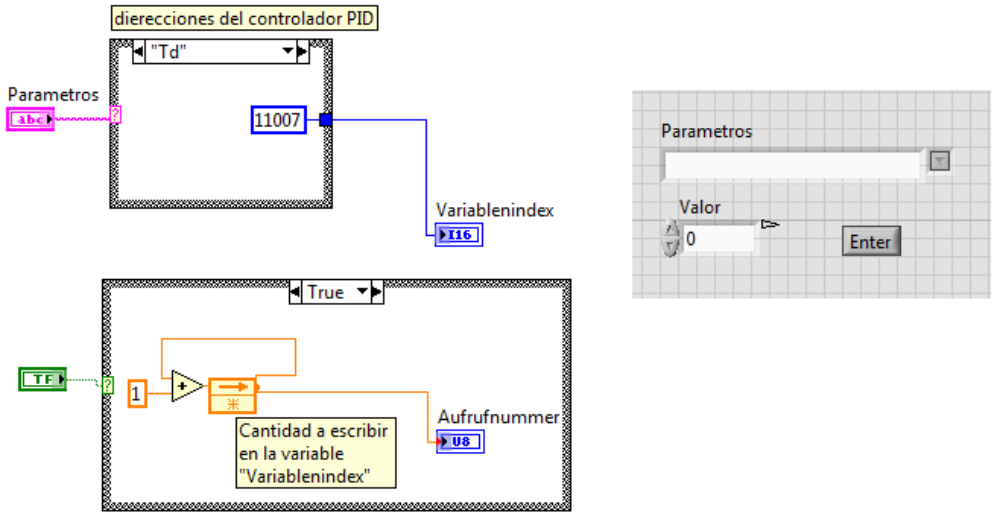


Figura 7. Panel frontal y diagrama de bloques en donde se cambian los valores del controlador Online.

Para el control de la bomba centrifuga, se empleó una tarjeta de adquisición de datos NI MYDAQ, la cual permite enviar las señales para encender y apagar la bomba. En este punto se construyó un programa en LabVIEW (VI), el cual contiene salidas digitales, que serán conectadas por entradas booleanas, como se observa en la figura 12.

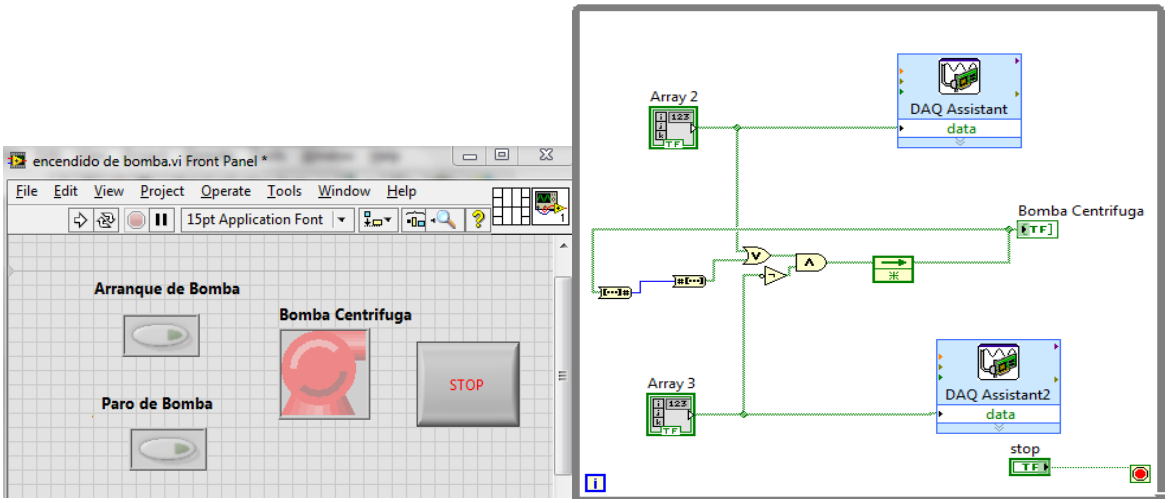


Figura 8. Programa correspondiente al control de la bomba.

Para generar las señales de encendido y paro de la misma se utilizan las salidas AI1 y AI7 (Puerto digital), las cuales controlan 2 relevadores de 5 volts de corriente directa, que a su vez gobiernan 2 relevadores de 24 volts de corriente directa, pertenecientes a los módulos de Festo Didactic. De estos últimos uno sirve para puentear el botón de arranque de la bomba (arranque) y el segundo se conecta en serie con la bobina de encendido de la bomba, lo cual apaga el motor, ver figura 13.

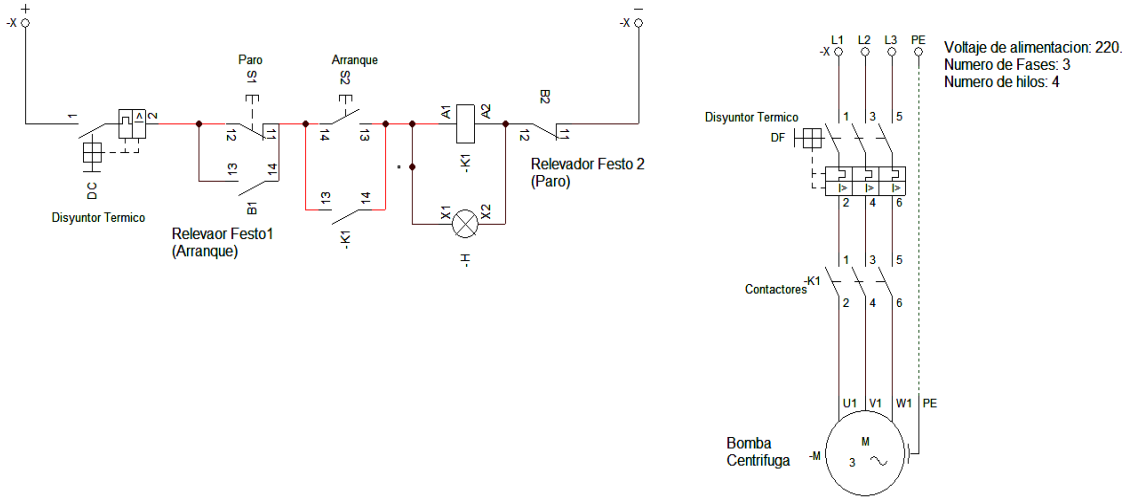


Figura 13. Diagrama de control y fuerza de la bomba centrifuga.

2.2 Adquisición de video.

Para adquirir video se necesita el módulo de LabVIEW NI Vision Development, que incluye IMAQ Vision, además de una biblioteca de funciones para procesamiento de visión y el Vision Assistant un entorno interactivo.

Para poder capturar imágenes con LabVIEW a través de una webcam, primero que nada se requiere instalar en la computadora-servidor un controlador llamado IMAQdx, este controlador está disponible en el paquete de “Vision Development Module” y permite comunicar cualquier cámara, incluso una webcam con LabVIEW [14].

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Una vez que se cuenta con este driver instalado, aparece una paleta de funciones en LabVIEW que permite adquirir y procesar imágenes con las cuales es posible hacer diferentes tipos de procesamientos, como la adquisición de vídeo en tiempo real durante los experimentos. En la Figura 14, se muestra el diagrama de bloques para adquirir la imagen de la cámara de video en tiempo real, del laboratorio industrial de proceso RT-590, utilizado en la interfaz de control de flujo que se muestra en la figura 9.

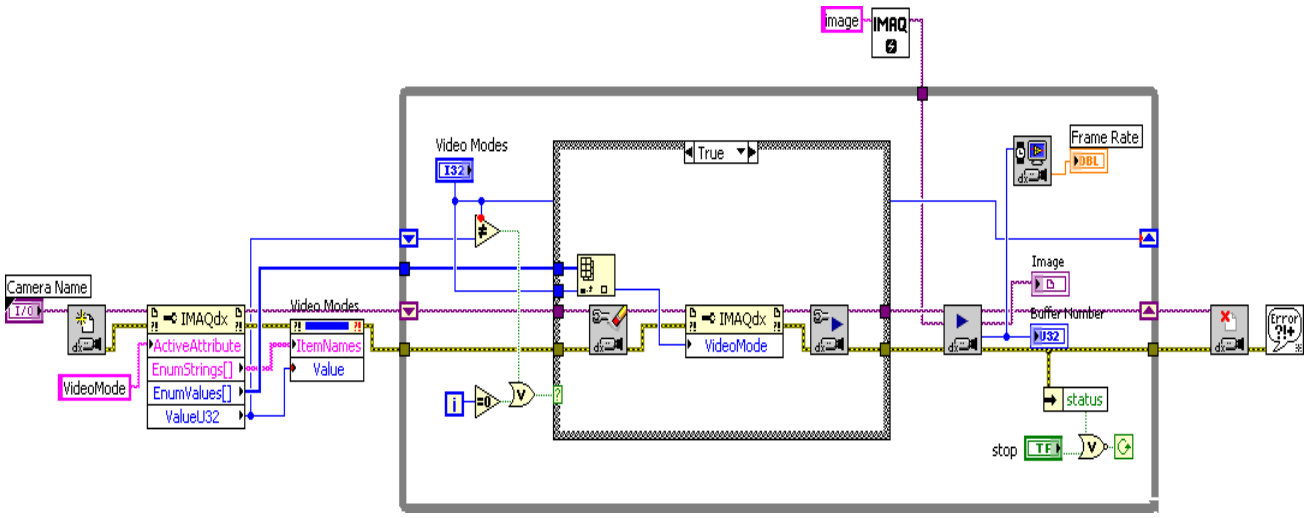


Figura 9.Diagrama de bloques utilizado en la interfaz de control de flujo.

2.3 Scada

Para representar tubería, bomba y válvulas manuales, se utilizó el Toolkit de LabVIEW DSC (SCADA), el cual cuenta con variables booleanas caracterizadas y animadas de distintas formas. Cabe mencionar que se puede desarrollar de manera interactiva un sistema de monitoreo y control distribuido [15]. Este módulo incluye herramientas para comunicar con PLCs convencionales, así como controladores de automatización programables como objetivos, registro de datos a bases de datos históricos, administración de eventos, todo en entorno LabVIEW.

2.4 Enlace remoto.

El programa TightVNC permite realizar un enlace remoto con la interfaz de control, del laboratorio RT-590. Cabe mencionar que este software permite:

a) Utilización gratuita de la aplicación, tanto para alumnos como para el montaje del servidor en el ordenador del laboratorio de procesos industriales RT-590.
b) Control de parámetros de la conexión remota. Por ejemplo, hace posible seleccionar contraseñas de control y de visualización, evitar más de una conexión al laboratorio, cambiar el área de visualización. En definitiva, habilita la selección o modificación de las características que afectan a la conexión remota.
c) Sencillez en la forma de realizar la conexión para el alumno. Es decir, la conexión al laboratorio de procesos industriales RT-590 ha de realizarse mediante pasos sencillos y claros.
d) Facilidad en la interacción usuario conectado con el entorno para poder realizar las prácticas remotas. Ha de ser sencillo navegar una vez hecha la conexión remota y también desconectarse, para liberar el ordenador donde otros usuarios tendrán que conectarse también posteriormente.

El resultado que se obtiene cumpliendo todas estas características es una conexión remota que permite realizar prácticas en el laboratorio de procesos industriales RT-590, de forma remota con gran comodidad para el usuario final.

Esta aplicación (TightVNC), consta de dos partes para hacer la conexión remota, viewer y server. El sentido de la conexión se establece del Viewer al ordenador donde esté instalado el Server.

2.5 Viewer

El TightVNC Viewer es la parte del software requerida por el usuario (alumnos) para poder realizar la conexión con el ordenador del laboratorio (servidor), el cual permite visualizar y utilizar el escritorio o la aplicación seleccionada. Una vez que los alumnos ejecutan el Viewer deben seleccionar [16]:

El Server al cual se ha de conectar, ya sea una dirección IP o un sobrenombre que tenga esa máquina.

El tipo de conexión a Internet de que dispone el ordenador desde el que se realizará la conexión remota.

Con estas características los usuarios ya podrán llevar a cabo la conexión remota al Server. Cabe hacer mención que en la actualidad el navegador Chrome perteneciente a GOOGLE, brinda una aplicación gratuita viewer VNC, ver figura17, y no es necesario que sea descargada o instalada en los ordenadores, debido a que se instala y se ejecuta desde el mismo navegador [17].

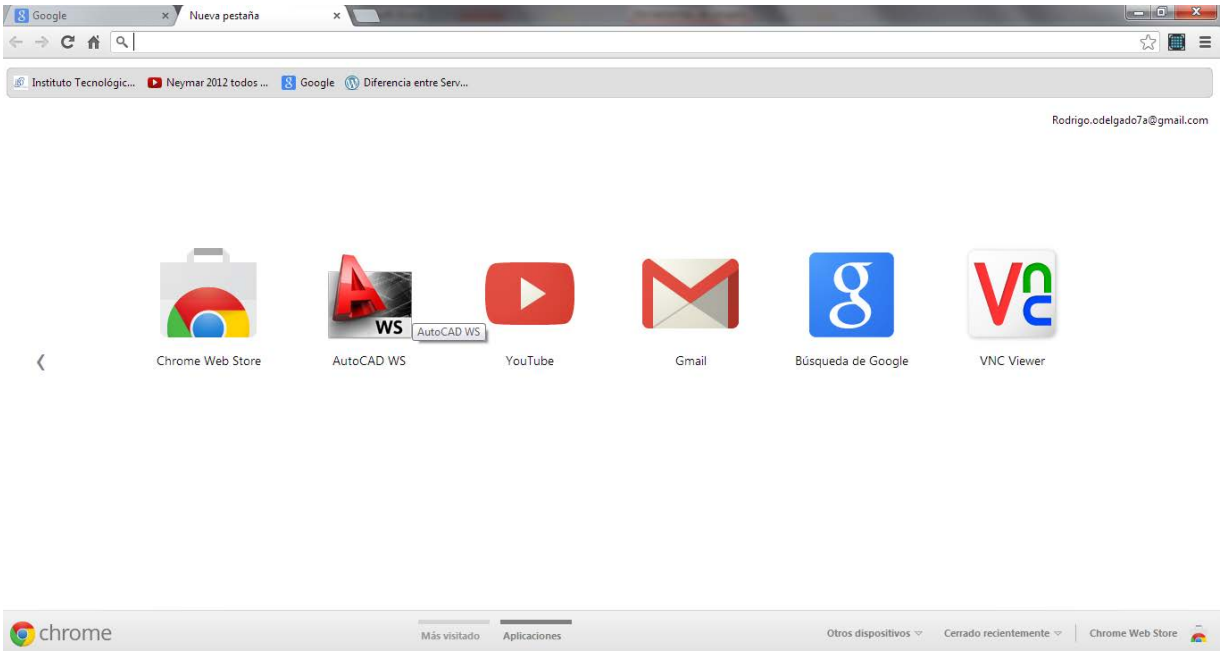


Figura 10. Aplicaciones de CHROME

Los campos de propiedades del TightVNC Server permiten editar diferentes parámetros. A continuación se describen los parámetros que se han de modificar para poder conseguir una buena conexión remota.

Una vez que se ha ejecutado el menú de propiedades del Server, aparecen cinco campos, conteniendo diferentes botones y ventanas de texto que permiten variar las características a controlar

en la conexión remota. En la tabla 3 se muestran los campos que permiten modificar las características de la conexión remota.

Tabla 3. Campos y funciones de TightVNC server.

Campo.	Función.
Contraseña de acceso	OBLIGATORIO ACTIVADO
Contraseña de visualización	OBLIGATORIO ACTIVADO
Asignar puertos de comunicación	OBLIGATORIO ACTIVADO
Acciones cuando hay una conexión	OPCIONAL
Acción al desconectar	OPCIONAL
Permitir transferencia de archivos	OBLIGATORIO DESACTIVADO

Para poder ingresar vía internet al laboratorio de procesos industriales RT-590 y poder visualizarlo es necesario teclear una contraseña. Estos dos parámetros pertenecen al grupo de cuatro, que deben cumplirse para conseguir una buena conexión remota, la cual permitirá la realización de prácticas en modo remoto.

Seleccionando el botón de 'Accept socket connections' se accede a la asignación de las contraseñas tanto de acceso como de visualización. Para poder decidir que contraseña permite acceder al control de la PC-SERVIDOR del laboratorio RT-590, hay que escribir una contraseña de 8 dígitos en la ventana de texto que está al lado 'Primary password', ver figura 18.

La contraseña de visualización tan solo permite ver el estado del escritorio del ordenador del laboratorio, no permite ni acceder a menús, ni ejecutar programas, tan solo se visualiza lo que está sucediendo en el PC donde se realiza la conexión. En este caso, la contraseña ha de ser también de 8 dígitos y se ha de escribir en la ventana de texto que está al lado de 'View-only ', ver figura 18.

Se utilizan contraseñas de 8 dígitos ya que es el valor de longitud máxima que permite el software TightVNC.

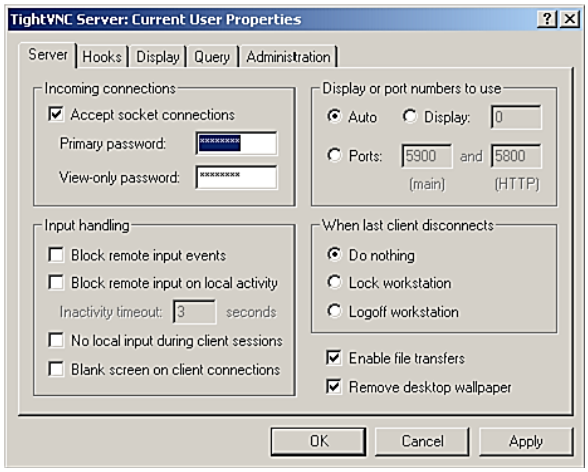


Figura 11. Campos de configuración del TightVNC-server.

La asignación de puertos de comunicación se realiza al seleccionar el botón 'Auto', de esta forma el programa gestiona la asignación de los puertos para establecer la conexión remota, ver figura 19, tanto en el sentido de la comunicación Viewer-Server como Server-Viewer.

Esta opción es la más flexible para garantizar el establecimiento de las conexiones remotas. Esto significa que con esta opción seleccionada, si el ordenador del laboratorio está utilizando determinados puertos para descargar algún archivo, intenta conectarse a una página web u otra acción, el Server se encarga de asignar puertos que estén libres a la comunicación que se establece para la conexión remota.

Los parámetros que se pueden seleccionar cuando se establece una conexión remota al Server del laboratorio RT-590, son dos. Estas dos acciones son opcionales y serán requeridas en función de situaciones que a continuación se explican:

Situación 1: Se quiere llevar a cabo una revisión del estado del panel laboratorio de procesos industriales RT-590, o del PC del laboratorio en período de realización de pruebas. Durante el período de tiempo que suceda está situación en el TightVNC Server se seleccionará el botón 'Block remote input events', ver figura 18, así los usuarios que se conecten remotamente podrán visualizar la pantalla del escritorio del PC del servidor, pero no podrán llevar a cabo ninguna acción

Situación 2: Para no dejar visualizar en la pantalla del ordenador servidor las acciones que se están realizando desde la conexión remota. Seleccionando el botón 'Blank screen on client connections' se permite no mostrar nada en la pantalla del PC-servidor del laboratorio de procesos industriales Rt-590, mientras haya una conexión remota.

Esta acción puede suceder o bien durante la noche o a primera hora de la mañana. Ya que puede ser que la pantalla del PC no se apague por un descuido y alguien de la universidad pueda observar que el ordenador está funcionando solo y decida dar aviso para que sea apagado. Esto produciría que se tuviera que volver a encender todo el equipo.

Cabe hacer mención que existe un campo relacionado con otorgar permisos a la conexión. Si el parámetro está activado mediante la selección del botón 'Query console on incoming connections', ver figura 19, esta acción permite que cada vez que algún usuario desee conectarse al PC del laboratorio el Server preguntará si se desea permitir la conexión a la persona que esté en el ordenador del laboratorio. Si no hubiera nadie en el laboratorio el Server espera un tiempo fijo y hace una acción por defecto, la cual puede ser aceptar la conexión o rechazarla según se configure.

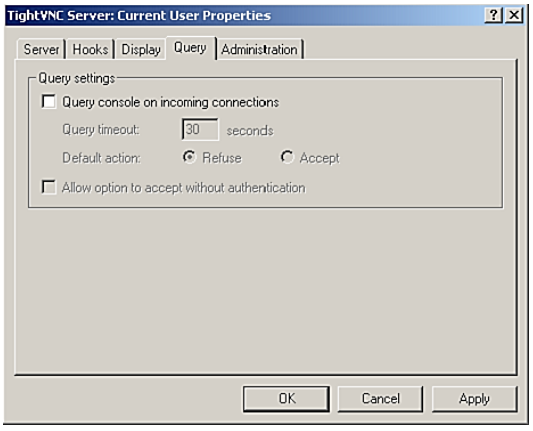


Figura 19. Campo Query.

Para la realización de las prácticas remotas el botón estará desactivado. Ya que no habrá nadie delante del ordenador del servidor para controlar todas las conexiones que se establezcan. Con la autentificación por contraseña ya se permite el establecimiento de la conexión remota.

Esta opción que permite controlar este parámetro, no pertenece al grupo de los cuatro que son prioridad para los enlaces con el servidor, explicados anteriormente, pero es muy importante que su

estado sea desactivado ya que el objetivo de la conexión remota es que los alumnos puedan trabajar con el Laboratorio de procesos industriales RT-590 y no enviar o recibir archivos del ordenador del laboratorio.

Figura 20. Campo de transferencia de datos.

No hay que dejar seleccionado el botón de la figura 20, así ningún usuario que se conecte remotamente al Server podrá realizar ninguna acción relacionada con la transferencia de archivos, ya sea de envío o recepción.

Con este parámetro se controla la no saturación de la memoria del disco duro del PC-servidor, debido a posibles envíos de archivos por parte de usuarios. Esto también permite regular la permisividad de copia de archivos que pertenezcan al contenido del ordenador.

Al seleccionar el botón 'Full desktop', ver figura 21, en el campo Display, permite al Viewer visualizar toda la pantalla del escritorio del PC donde está siendo ejecutado el Server.

El parámetro que viene dado por el botón 'Rectangular area' es útil, ya que esta opción hace que el Viewer solo pueda visualizar un área, previamente delimitada, de la pantalla del PC donde se conecta. Aun así se considera más efectivo que desde el Viewer se pueda visualizar toda la pantalla PC del laboratorio.

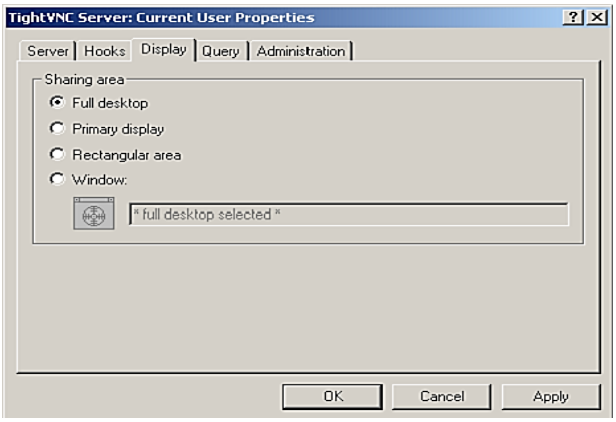


Figura 12. Configuraciones de pantalla.

2.6 Administración.

En esta ventana, el parámetro a resaltar es el 'Connection priority', ver figura 22. El valor tiene por defecto otros parámetros que al ejecutarse el TightVNC Server ya son correctos.

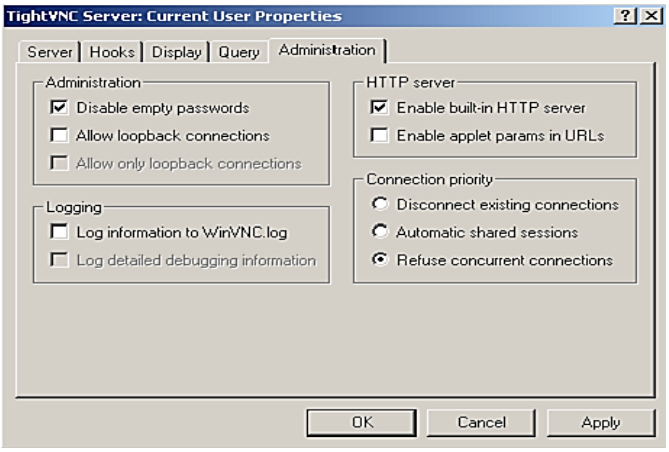


Figura 22. Ventana ADMINISTRACION

El campo importante en esta ventana es la del botón 'Refuse concurrent connections'. Esta opción no permite conexiones simultáneas, es decir que al tener el botón seleccionado, el Server no permitirá conectarse a nadie más mientras haya algún Viewer conectado. Si se produjeran dos conexiones a la vez esto provocaría muchos problemas en el ordenador del laboratorio ya que tendría que obedecer órdenes diferentes de ubicación de ratón, de ejecución, esto podría llevar a la desconexión del PC o de las dos conexiones remotas.

TightVNC Server permite controlar las cuatro principales acciones para garantizar una buena conexión remota desde diferentes campos de sus propiedades. Estas cuatro acciones son:

a) Establecer contraseña de acceso y de visualización.
b) Visualizar pantalla completa del PC del laboratorio remoto de procesos industriales.
c) No permitir conexiones simultáneas.
d) Asignar puertos de comunicación automática.

La modificación de los botones o ventanas de texto que controlan estas acciones principales es fácil, tanto de localizar como de cambiar su valor.

Para conseguir aún más prestaciones en la conexión remota se pueden variar ciertos parámetros en función de la situación que se pueda producir en torno a la realización de las prácticas.

5. Resultados

En esta última sección, se explica y describe la prueba final de implementación, como laboratorio remoto, del "Laboratorio industrial de procesos RT-590". Como primer paso se requiere tener un navegador de internet instalado, en lo particular recomiendo Chrome de GOOGLE, ya que posee una aplicación de TighVNC, ver figura 23.

El siguiente paso es seleccionar la aplicación TighVNC y tipiar la dirección IP, ver figura 24. Una vez que se estableció comunicación con el servidor VNC, se requiere tipiar una contraseña, como lo muestra la figura 25.

Enseguida aparece una ventana encimada del navegador, la cual corresponde al TighVNC viewer. Dentro de la ventana TighVNC, aparece una pantalla de menú con las opciones de experimento de presión y experimento de flujo, ver figura 26.

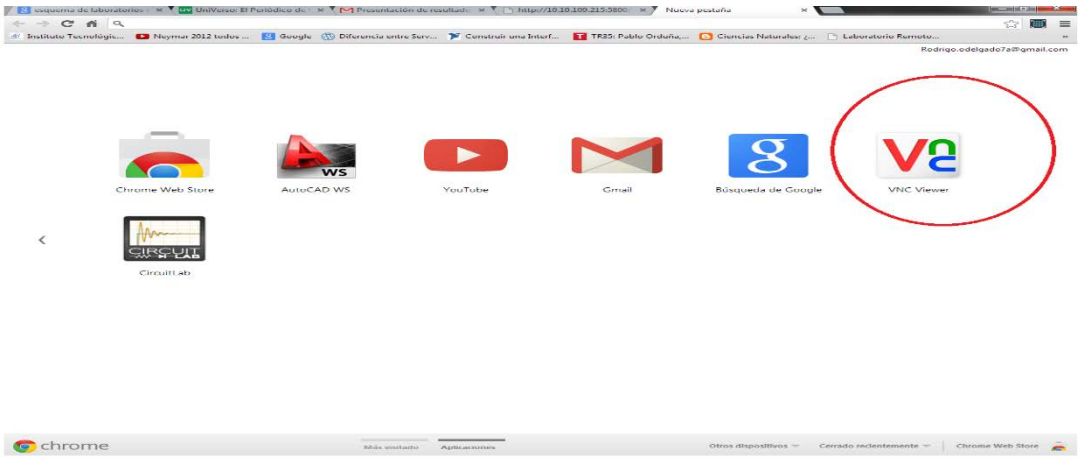


Figura 13. VNC como aplicación del navegador CHROME

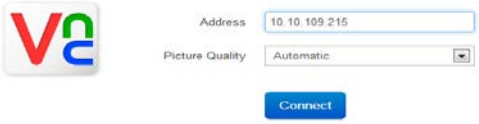


Figura 14. Insertar dirección en VNC de CHROME

Figura 15. Introducir contraseña VNC

Figura 26. Menú del laboratorio remoto RT-590 Figura 16. Menú del laboratorio remoto RT-590

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

En la figura 27 se puede apreciar la interfaz de usuario para operar remotamente el laboratorio de procesos industriales RT-590, en el experimento de control de flujo.

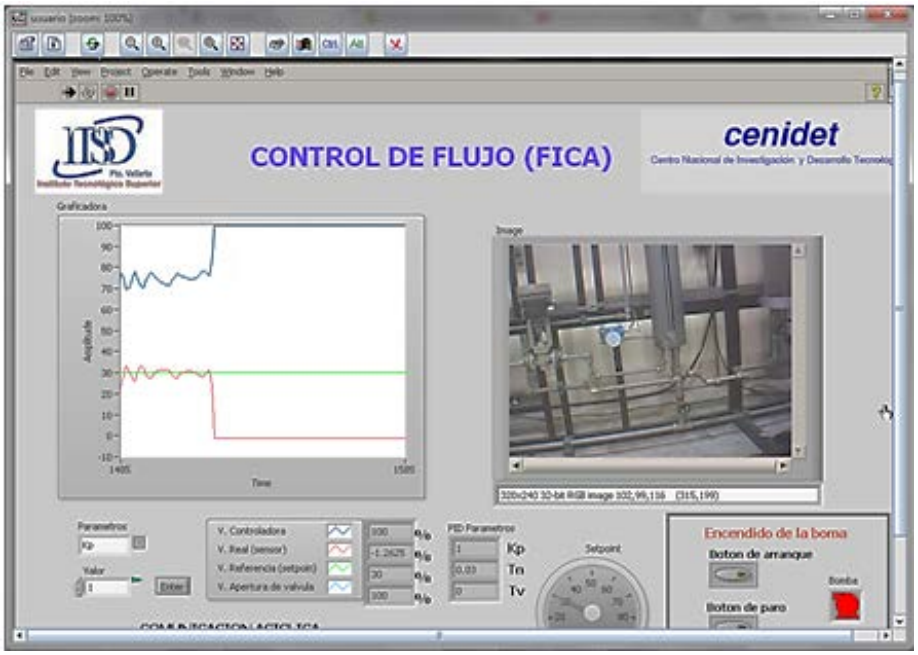


Figura 27. Vista de la interfaz de control, del experimento de control de flujo, de la implementación como laboratorio remoto del RT-590.

Las acciones realizadas durante el experimento son:

a) Encender y apagar la bomba, esta acción se puede realizar de manera presencial normalmente, es decir, en el módulo de control están instalados los botones de arranque y paro con su respectivo indicador. Al encender la bomba provocamos que el líquido que se encuentra en el tanque V1 se desplace al tanque V2.
b) Sensar el desplazamiento de líquido entre los tanques, mediante un diafragma, esta señal es mandada al controlador PROTRONIC 500, que a su vez trasmite la señal a la interfaz, como lo podemos observar en la figura 27 en el graficador (línea roja).
c) Monitorear el comportamiento de la variable controladora, esto se aprecia en la figura 26, dentro del graficador (línea azul).
d) Manipular los valores de la parte proporcional, derivativa e integra del controlador PROTRONIC 500, mediante la ventana parámetros, que es en donde se selecciona que parte del PID se va a modificar. Cabe mencionar que en la ventana valor, se escribe el valor del parámetro.
e) Observar el punto de referencia marcado por el controlador, como se aprecia en la figura 26 dentro del graficador (línea verde).
f) Observar el comportamiento de la planta con la ayuda del módulo de visión de LabVIEW , el cual permite ver en tiempo real, lo que capta una cámara instalada en la computadora de base, ubicada en frente del tanque V2.

La conexión duró cerca de 35 minutos. El único inconveniente que se presentó fue un retraso de medio segundo en la captura de video. En cuanto concluyó la práctica de control de flujo, se terminó la conexión con su respectivo ícono y el sistema quedó listo para un nuevo usuario. Se realizó una nueva prueba pero ahora con un dispositivo móvil, en la cual se hizo nuevamente la práctica de control de flujo, con algunos contratiempos solo la captura de video.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

6. Conclusiones.

En este documento se presenta el desarrollo de una estación de monitoreo para el “Laboratorio de procesos industriales RT-590”, ubicado en el Instituto Tecnológico Superior de Puerto Vallarta (ITS-PV), así como la publicación en internet del panel frontal del experimento de control de flujo.

Se desarrolló un sistema que permite monitorear la variable de flujo de un módulo perteneciente al “Laboratorio industrial de procesos RT-590”, ver figura 28. Esta aplicación en tiempo real (de ahí el nombre del laboratorio RT-590), tiene la cualidad de permitir analizar el comportamiento del proceso de control de flujo de agua, entre los tanques V1 y V2, empleando por la válvula de control de flujo. Para publicar el panel frontal de la interfaz en internet se empleó un software llamado TighVNC, el cual permite visualizar una aplicación o una sección del escritorio de cualquier PC, lap top o algún dispositivo móvil (tablet o celular), en un navegador de internet. El Tigh VNC, permite a cualquier Web para visualizar en línea el estudio del laboratorio de procesos industriales o en comprobación de teorías de control, con fines didácticos, en la realización de tareas de publicación de información y/o en la supervisión o tele-operación. Gracias a TighVNC se obtiene una interfaz basada en LabVIEW, la cual es económica y compatible con cualquier sistema operativo. Esto permitirá que los estudiantes del ITS-PV o cualquier usuario con autorización, puedan acceder a trabajar con el laboratorio industrial de procesos RT-590.

Figura 28. Arquitectura de la interfaz remota del experimento de control de flujo.

Una alternativa de publicación del panel frontal de la interfaz, la cual se desarrolló en LabVIEW, es NI LabVIEW Remote Panels, cuya limitante es la de únicamente poder publicar en el navegador de internet explorer.

No está demás comentar algunas de las problemáticas presentadas: La única variable que no se logró manipular a distancia fue el set point, pero para el experimento de control de flujo se puede prescindir del mover la referencia ya que al apagar la bomba la señal del sensor (variable real), se va a cero. Esta limitante es la principal razón por la que se seleccionó el experimento de control de flujo para la implementación remota, ya que el experimento de presión si requiere modificar el valor de set point para cambiar de ejercicio. Además hay que sumar que no se pudieron adquirir las electroválvulas lineales (On/Off), para poder cambiar de experimento, sin embargo, el laboratorio remoto se probó con éxito al llevar a cabo a distancia el experimento de control de flujo.

Una limitante más es que debido a restricciones por parte del personal encargado de la red de cómputo, no se permitió abrir los puertos para el uso de TighVNC afuera del ITS-PV, con lo cual el laboratorio solo se oferta en la intranet del ITS-PV.

Para que el laboratorio remoto se encuentre operando sin complicaciones, es necesario que se realicen operaciones de mantenimiento periódicas, las cuales consisten en una limpieza a los tanques, esto permitirá que las lecturas en las mirillas de los tanques se aprecien con claridad al ser captadas por la cámara de video. Estas acciones deben realizarse cuando menos cada 6 meses, esto ayudará a prolongar la vida útil del laboratorio industrial de procesos RT-590.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

La figura 29 muestra la arquitectura de la interfaz del laboratorio de prácticas a distancia o laboratorio remoto (LR). La prueba final de implementación, como laboratorio remoto, del “Laboratorio industrial de procesos RT-590”.

Figura29. Interfaz remota, vista desde un dispositivo móvil.

Queda de manifiesto el agradecimiento al Instituto Tecnológico Superior de Puerto Vallarta el haber prestado sus instalaciones para poder llevar a cabo este proyecto.

Currículo corto de los autores:

Rodrigo Oliver Delgado Arcega, Ingeniero Electricista egresado del Instituto Tecnológico de la Laguna en 2002. Obtuvo el grado de Maestría en Ciencias de Ingeniería en Mecatrónica en el 2013 en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, en Cuernavaca Morelos México.

Fabio Abel Gómez Becerra, Ingeniero en Ciencias Navales, egresado de la Heroica Escuela Naval Militar en 1981. Obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica, en el CENIDET en 2013, Docente ITS de PV y Estudiante de Doctorado en Ingeniería Electrónica con especialidad en Control Automático en el CENIDET.

Julio Cesar Robles, Ingeniero Electricista egresado del IPN. Estudio la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica en el CENIDET.

Referencias

[1] M. Adulawahed, "The triLab, a novel ICT based acces mode laboratory education model," Computer & Education, pp. 262-274, 2010.
[2] A. Borisov., Remote Acces Laboratory for Electronic Course, IEEE, 2008.
[3] J. M. Casas, "Laboratorio remotos de estructuras e ingenieria sismica y dinamica estructural," Grupo de investigacion G7, Caldas, 2006.
[4] M. F. M. J. J. R. A. P. D. G. A. B. R. Á. A. S. B. J. A. Domínguez, "Estrategias docentes colaborativas basadas en la utilizacion de laboratorios remotos via internet," in Congreso universitario de innovacion educativa en las enseñanzas tecnicas, Gijon España, 2006.
[5] Gunt, "Manual de experimentos RT-590 Sistema de control de procesos industriales," Gunt, Hamburgo alemania, 2004.
[6] M. V. ,. L.-G. A. V. R. P. Castello, "Integracion de dispositivos fisicos en un laboratorio remoto de control mediante diferentes plataformas:LabView,Matlab y C/C++," Comite español de automatica, Barcelona, 2010.
[7] K. S. E. Mehmet, "An Internet based real-time remote automatic controllaboratory for control education.," Elsevier, Istambul Turkey, 2010.

[8] M. B. Guzman, "Laboratorio remoto para una maqueta de invernadero," Almeria, S/año.
[9] J. M. R. S. R. G. J. t. B. A. L. V. D. O. H. A. C. E. J. A. S. Casas, "Laboratorios Remotos de estructuras e ingeniria sismica y dinamica estructural," Instituto colombiano para el desarrollo de l ciencia, Caldas, 2005.
[10] T. Jover, "Laboratorio remoto para la enseñanza de redes TCP/IP," Girona España.
[11] M. Macias, "http//:TeleLab.mty.itsm.mx," Chiapas, 2008.
[12] H. Vargas, "A Network of Automatic Control web-based Laboratories.," IEEE Transactions on learning tecnologies, pp. 197-208, 2011.
[13] D. Lowe, Evolving Remote Laboratory Architectures to leverage Emerging Internet Tecnologies, IEEE Cs & ES, 2009.
[14] C. A. A. Ladino, "Laboratorio remoto aplicada a la reduccion de distancia," Bogota Colombia, 2008.
[15] G. A. M. B. y. C. E. O. Morales, "Laboratorio virtal basado en la metodologia de aprendizaje basado en problemas, ABP," Educacion en ingeniería, pp. 62-73, 2009.
[16] F. Rivas Cruz, "Sistema de Monitoreo y Control en Línea para una Planta Piloto de Destilación (SPPD)," 2006. [Online]. Available: http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-12163. [Accessed 18 febrero 2013].
[17] M.A.Gonzalez, Laboratorios remotos en la WEB, una herramienta para la cooperacion al desarrollo en el campo de la educacion, Valladolid España: UVa, 2008.
[18] L. P. a. J. V. Petr Sdadeka, "Remote laboratory- new posibility for school experiments," Elsevier, Czech Republic, 2009.
[19] M. M. J. Vela, "Sistema de monitoreo remoto con Labview," Contacto industrial, pp. 8-13, 2008.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

18. Propuesta de diseño simple de la estructura y las articulaciones para un exoesqueleto de miembro inferior de uso continuo. Caso de sustitución por enfermedad

Rodríguez Martínez Rafael[1], López Amaya Julio Alberto[2*], Urriolagoitia Sosa Guillermo[1], Sánchez Martínez Ignacio[1], Romero Ángeles Beatriz[3]

ljulio.950@gmail.com;

[1]Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Profesional "Adolfo López Mateos", S/N, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación 2th piso, Col. Lindavista, Del. G.A.M.,México, D.F.

[2*]Estudiante de 4° semestre de la licenciatura en Ingeniería en Control y Automatización de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco

[3]Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Profesional Azcapotzalco. Av. de Las Granjas No. 682, Col. Santa Catarina, Del. Azcapotzalco, México, D.F.

Resumen

En tiempos recientes se ha establecido un debate entre expertos y académicos acerca del impacto social y económico de los avances en la robótica. Los exoesqueletos robóticos montados como trajes sobre las partes afectadas del cuerpo humano, representan uno de los ejemplos más significativos sobre hacia donde está orientada la robótica. Con los recientes avances tecnológicos se han incrementado los campos de aplicación de esos dispositivos ampliamente, con respecto a las primeras aplicaciones que eran de teleoperación y de incremento en la fuerza de un ser humano para diversas tareas. El objetivo de éste trabajo, es contribuir en lo posible, para empezar una discusión sobre la visión de la oferta de los futuros desarrollos en términos del impacto socioeconómico, resultando del uso de exoesqueletos robotizados, especialmente con respecto a su aplicación en rehabilitación médica de miembro inferior y sobre todo el uso permanente, sustituyendo dispositivos incómodos tales como las muletas, las andaderas, los bastones. Todo esto enfocado al sector salud, para que la mayoría de afectados por diferentes enfermedades puedan tener acceso a éstos aparatos. En este trabajo, sólo se propone un diseño que podría ser de bajo costo y uso para diversos padecimientos.

Palabras clave: Exoesqueleto, robótica, miembro inferior, articulación, automatización.

1. Introducción

Los primeros estudios acerca del movimiento de miembro inferior asistido por órtesis datan de los 1960's en Estados Unidos [1] y en la recién formada Yogoslavia [2] respectivamente, con propósitos militares y médicos [3]. Desde entonces, órtesis y exoesqueletos se han ido desarrollando prósperamente, en diferentes tipos de estructuras, actuadores e interfaces. Hoy en día, se establecen desde el punto de vista como herramientas para aliviar el duro trabajo de terapistas físicos, mientras que la mejora (neurológica u ortopédica) recupera la eficacia de movimiento del paciente –Loko Mat[4], LOPES [5], ellos, también son el objetivo de ayudar a parapléjicos o personas cuadrapléjicas, para

recuperar la capacidad de locomoción en la vida diaria –ATLAS [6], Re Walk™ [7], Ekso (Ekso Bionics, US, formerly eLEGs [8]); que se adoptan como sistemas de aumento de capacidad de fuerza en las personas sanas con el fin de transportar cargas pesadas –BLEEX [9], Sarcos Exosqueleton [10], MIT Exosqueleton [11]. Por otra parte, situándose en la utilización de exoesqueletos de miembro inferior, como parte de la ayuda para la autonomía motriz a pacientes del sector salud mexicano es necesario considerar que existen numerosas causas que pueden afectar el funcionamiento del sistema locomotor humano, dando lugar a la aparición de trastornos de la articulación de la extremidad inferior y la generación de patrones de marcha atípica. La importancia de la investigación y desarrollo en tecnologías de asistencia para compensar la marcha patológica han sido reconocidos desde inicios del veinteavo centenario, y numerosos desafíos todavía quedan por delante para hacer de su aplicación clínica una realidad.

En éste trabajo, el miembro inferior se presenta como un exoesqueleto, concebido como un sistema de compensación y evaluación de la marcha patológica, para aplicaciones en condiciones reales como una metodología de asistencia y evaluación conjunta de los problemas que afectan la movilidad en individuos con desórdenes neuromotores.

Los principales retos tecnológicos se discuten con respecto a la detección, actuación y subsistemas de control. Un énfasis especial es puesto en los avances en robótica para órtesis de miembro inferior, y los requerimientos biomecánicos, se analizan consideraciones de diseño estructural, y los enfoques existentes para desarrollar controladores robustos en tiempo real, para soluciones portátiles con un objetivo común, el control del motor humano.

2. Marcha humana normal y patológica

En cuanto a discapacidades de la marcha debido a las condiciones neurológicas, ortopédicas o traumáticas, existen diferentes enfoques robóticos, y una clasificación de exoesqueletos robóticos para miembro inferior, se presenta en robots de rehabilitación, sistemas de evaluación y seguimiento y sistemas portátiles de recuperación funcional.

El proceso cíclico de los eventos durante la marcha se conoce como el ciclo de marcha, y se inicia y termina en el momento en que uno de los pies entra en contacto con el suelo, y comienza la fase de apoyo. Mientras que una pierna se desplaza moviendo el cuerpo, la otra pierna actúa como un soporte; Por lo tanto, el estado de la extremidad inferior se divide en dos fases en función de su situación con respecto a la planta: fase de impulsión y fase de apoyo. Durante la marcha a velocidades normales hay un corto período de soporte simultáneo de ambas piernas. Como la velocidad aumenta se alcanza un ciclo en el que no existe soporte bipodal. La marcha se puede caracterizar por un conjunto de parámetros: longitud de la zancada, la longitud del paso, ritmo y velocidad. La complejidad del proceso de la locomoción humana implica el estudio del movimiento cíclico que se ejecuta, considerando la cinemática y la cinética (fuerzas y momentos) y también el trabajo, la energía y la potencia que se consume en el proceso. Por otra parte, para entender todo el fenómeno, es necesario tener un conocimiento de los principios neurológicos que controlan el movimiento, la periferia de entrada o sistemas sensoriales que intervienen y los mecanismos que comandan el sistema musculoesquelético.

3. Estructura del exoesqueleto

Dependiendo del tipo de interfaz o ajuste del sistema a la extremidad, unilateral o bilateral una estructura se puede utilizar. Por ejemplo, si las interfaces no pueden generar un par suficiente en el plano transversal en los puntos de conexión con las barras laterales, un sistema unilateral no es viable. A la inversa, si las interfaces pueden generar momentos en el plano transversal, es posible utilizar un exoesqueleto unilateral, cuyos apoyos son rígidos para hacer la estabilización en el plano sagital. La alineación en una solución bilateral es un problema crucial porque si las dos articulaciones no son paralelas, la fricción y el esfuerzo no deseado serán producidos en cada paso. Para el diseño de la estructura mecánica se utilizó un marco unilateral, con cuatro interfaces de carga en las superficies

blandas, como el más adecuado para poner a prueba la aplicación de estrategias de compensación. La configuración del exoesqueleto adoptado consistió en dos articulaciones, una de la rodilla, la cual fue cambiada en último momento por una más eficiente que consiste de un mecanismo policéntrico de 4 barras [12] que genera una trayectoria más precisa del centro instantáneo de rotación, haciendo que ésta articulación, que es la más delicada por sus grados de libertad sea más adecuada para el exoesqueleto y otra del tobillo incluido solo con un grado de libertad, barras laterales unidas al muslo (proximal), la pierna (distal) y el pie (apoyo y plantilla insertada en el zapato), y cuatro bandas de fijación a la extremidad.

Para realizar el diseño se tomaron en cuenta factores muy importantes como la compensación por inestabilidad del tobillo, la compensación de la inestabilidad de la rodilla, la condición de impacto contra el suelo, de tal manera que el mecanismo completo fuera capaz de compensar esas inestabilidades por medio actuadores montados en las articulaciones de la rodilla y el tobillo. En la Figura 1 se muestra el exoesqueleto (sin los actuadores compensadores montados) donde se puede observar que la articulación planteada originalmente, fue sustituida por un mecanismo policéntrico de 4 barras, bastante estable en las fases de swing en la marcha y la fase de apoyo.

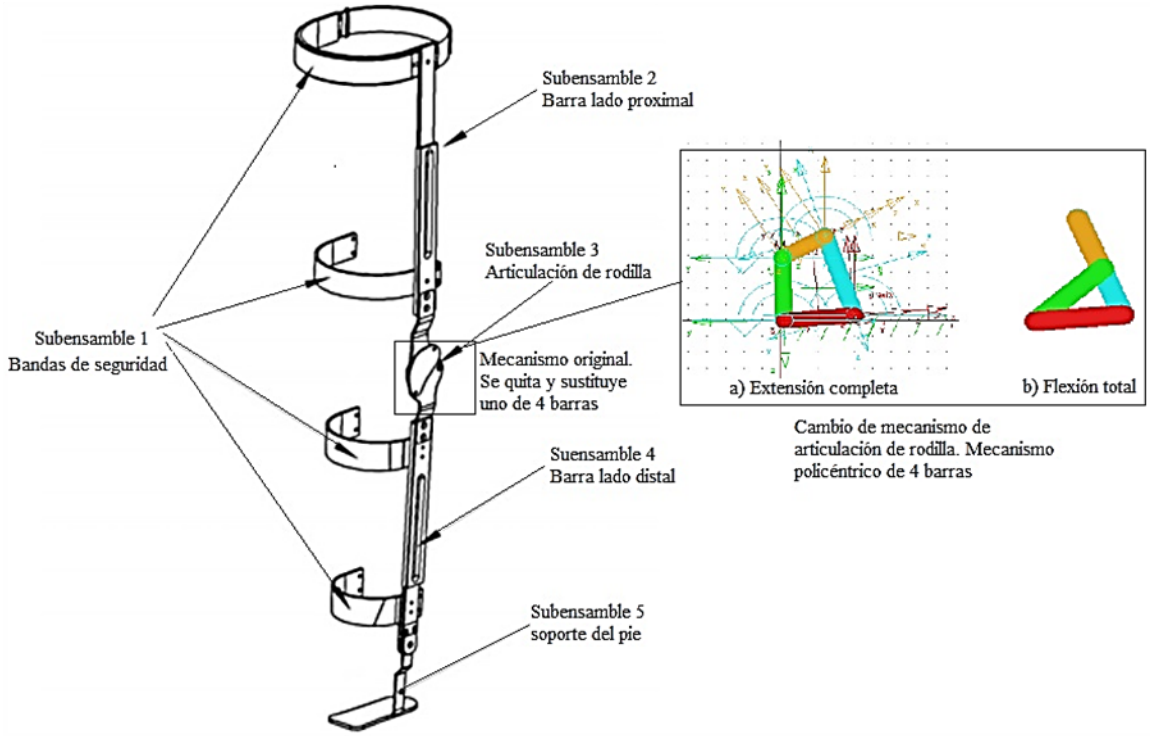


Figura 1. Ensamble completo del exoesqueleto, el cual muestra la articulación de rodilla que fue cambiada [12]

El movimiento principal de la articulación de rodilla es la flexo-extensión que ocurre en el plano sagital; éste no es un movimiento rotacional simple, pues si así fuera, al girar el fémur encima de la tibia la rodilla acabaría luxándose [13]. Durante la flexo-extensión de rodilla, el fémur, además del movimiento giratorio, efectúa un movimiento de deslizamiento sobre los platillos tibiales, lo cual hace que el eje de rotación no sea fijo y por tanto exista un Centro Instantáneo de Rotación (CIR). La articulación de rodilla realiza sus movimientos naturales gracias al uso de una compleja estructura de músculos, tendones y ligamentos.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

3.1 Síntesis del mecanismo de rodilla

La síntesis del mecanismo policéntrico de rodilla se realizó utilizando el *algoritmo genético* desarrollado por Lugo [12] el cual se adaptó fácilmente a la estructura femoral y a la tibial. El algoritmo genético general para la síntesis se puede solicitar al autor. Esto es, se trata de un programa bastante extenso que Lugo desarrolló para la síntesis de mecanismos de cuatro barras, incluyendo los policéntricos, como es el caso de la rodilla y los monocéntricos como el del tobillo.

3.2 Balanceo de la articulación de rodilla

Dadas las rotaciones lineales se encontró que el funcionamiento de las juntas del conjunto para algunas fases del ciclo de marcha, el principio de funcionamiento del actuador de rodilla (Figura 2) está dada por: un elemento elástico K2 que se activa al contacto del talón, con bloqueo en B1, en la fase de postura inicial, la aplicación de rigidez K2 en la rodilla con una trayectoria longitudinal máxima correspondiente a un ángulo de flexión de restricción. Un elemento elástico K1 (resorte de compresión) se activa en la fase de apoyo terminal, mediante el desbloqueo de B1 para liberar la articulación y permitir oscilación libre, teniendo en cuenta que K2 >> K1. El elemento presenta un desplazamiento longitudinal máximo, que corresponde a la restricción de la flexión de la rodilla. Bloqueo total en B1 para mantener toda la pierna en extensión y dar seguridad al ponerse de pie o subir o bajar escaleras o pendientes. El elemento elástico K2, configurado utilizando discos Belleville apilados, tiene una trayectoria máxima de 13 mm que corresponden a 15 grados de flexión, que permite una respuesta de carga segura y extensión consecuente antes de girar. El elemento elástico K1 presenta un desplazamiento máximo de 55 mm, que corresponde a una flexión de la rodilla de 95 grados. El actuador para el balanceo de la articulación de rodilla se seleccionó del catálogo de Festo [14] que se adecúa a las restricciones de movimiento de la flexo-extensión de la rodilla, en el caso de la flexión hasta 95° proporcionando una rigidez similar a la rodilla normal y en la extensión dejándola casi libre pero limitada muy cercana a los cero grados de extensión para impedir por medio del actuador la hiper-extensión, según se explica en la figura 2.

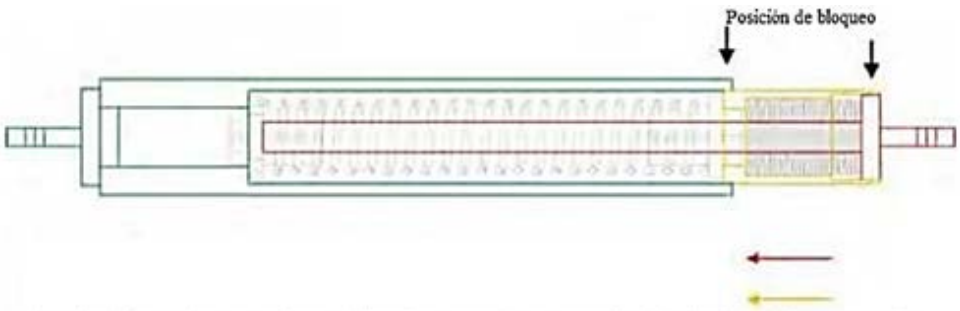


Figura 2 Actuador lineal para balanceo de articulación de rodilla

3.3 Balanceo de la articulación del tobillo

El mecanismo de tobillo es mucho más fácil de sintetizar, ya que se trata de un mecanismo articular pivotado sólo por un perno, donde únicamente se seleccionaron las longitudes mencionadas para determinar el amortiguamiento en flexión y en extensión como se describe en ésta misma sección. El sistema pasivo que actúa sobre el tobillo contiene resortes que están dimensionados de acuerdo con las relaciones lineales dadas por K3 y K4 las cuales modelan el funcionamiento de la junta, el principio de funcionamiento del actuador de tobillo (Figura 3) está dado por: un elemento elástico K3 que se comprime, almacena energía y controla la flexión dorsal de la fase de apoyo. En la compresión, K3 tiene una trayectoria longitudinal máxima equivalente a una restricción de la flexión dorsal del tobillo. La

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

energía almacenada en la flexión dorsal se recupera hacia una trayectoria de flexión plantar antes de pivotar con la extensión del K3. Un elemento elástico K4 que añade rigidez a la extensión para controlar la flexión en postura plantar y evitar la caída del pie durante el swing. El elemento tiene una trayectoria longitudinal máxima equivalente a una restricción de la flexión plantar del tobillo.

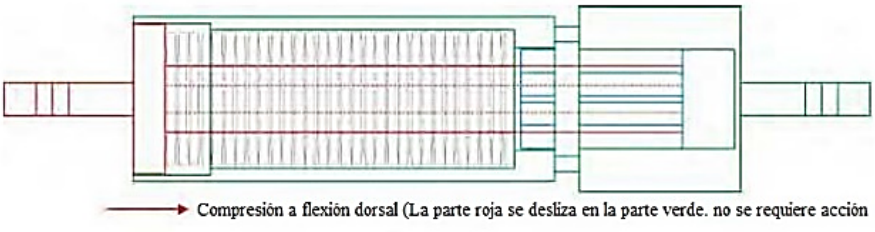


Figura3. Actuador lineal para balanceo de la articulación de tobillo

Finalmente, se debe mencionar, en particular, que para el diseño del actuador de rodilla integrado a la articulación del tobillo, el elemento elástico K3 (discos Belleville apilados) se comprime con una trayectoria de 15 mm equivalente a 20 grados de flexión dorsal del tobillo. El elemento de compresión elástico K4 tiene un máximo desplazamiento en flexión plantar de 6,5 mm, equivalente a 15 grados de flexión. El diseño final del sistema de accionamiento biarticular integrado en la estructura completa del exoesqueleto se muestra en las Figuras 4 y 5.

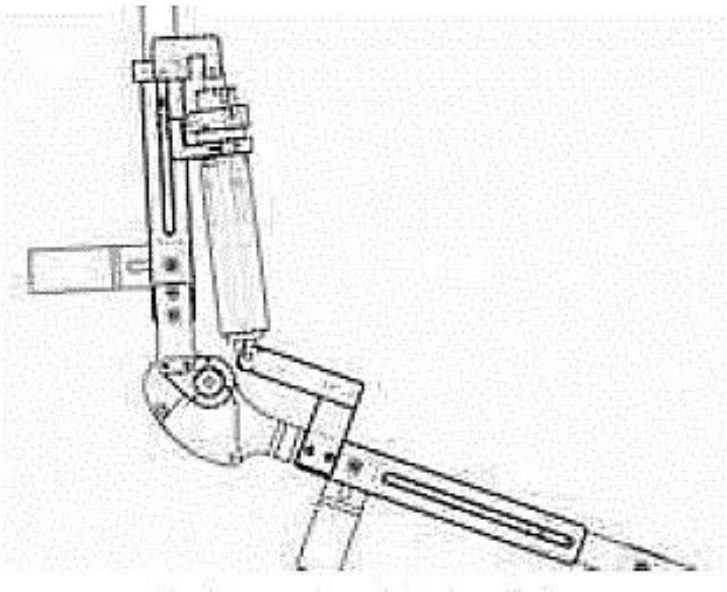


Figura 4. Articulación completa de la rodilla

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

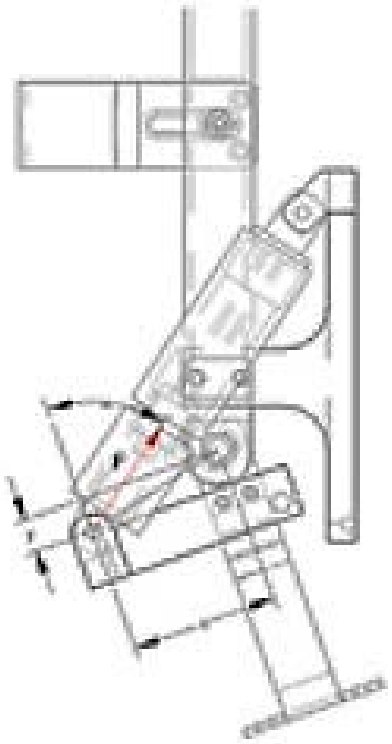


Figura 5. Articulación completa del tobillo

4. Resultados

Los resultados obtenidos se muestran concretamente, de la siguiente forma:

La armadura es muy esbelta, lo cual no sacrifica resistencia, ya que es hecha de duraluminio y debido a esto es muy ligera.

El costo del exoesqueleto es relativamente bajo, con respecto a otros sistemas robóticos de marcas comerciales.

Debido al tipo de sujeción al miembro inferior, el montaje y desmontaje es muy fácil.

Se integró al sistema exoesquelético una articulación policéntrica de cuatro barras articuladas de alta eficiencia y muy estable en casi todo el movimiento de flexo-extensión.

5. Conclusiones

Las conclusiones que se obtienen de éste trabajo son muy alentadoras, ya que de poder fabricarse y ser utilizado en el sector salud, se podrían hacer pruebas experimentales en pacientes diversos, las cuales arrojarían resultados de gran valor para poder mejorar los aspectos del exoesqueleto y optimizarlo para el uso exclusivo de los sectores de la población que no tienen acceso a sistemas privados de atención médica, es decir, el proyecto de éste exoesqueleto se haría lo más

económico posible para que el sector salud pudiera adquirir el número necesario para la atención pública de los pacientes que así lo requieran.

Referencias

[1] Mosher R., "*Handyman to hardiman, Technical Report", SAE Technical Paper*, 1967.
[2] Vhbjgjb M., Vukobratovic, B. Borovac, D. Surla, D., *"Stokic, Biped Locomotion"*, Springer-Verlag, 349p, 1990.
[3] Dollar A., Herr H., *"Lower extremity exoskeletons and active orthoses"*, challenges and state-of-the-art", Robotics, IEEE Transactions 24 (2008)
[4] Colombo G., Joerg M., Schreier R., Dietz V., et al., *"Treadmill training of paraplegic patients using a robotic orthosis"*, Journal of rehabilitation research and development Vol. 37, pp 693-700, (2000)
[5] Veneman J., Kruidhof R., Hekman E., Ekkelenkamp R., Van Asseldonk, Van Der Kooij E., *"Design and evaluation of the lopes exoskeleton robot for interactive gait rehabilitation"*, Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on Vol. 15, pp. 379-386, (2007)
[6] Sanz-Merodio D., Cestari M., Arevalo J., Carrillo X., Garcia E., *"Generation and control of adaptive gaits in lower-limb exoskeletons for motion assistance"*, Advanced Robotics Vol 28, pp. 329–338 (2014)
[7] Esquenazi A., Talaty M., Packel A., Saulino M., *"The rewalk powered exoskeleton to restore ambulatory function to individuals with thoraciclevel motor-complete spinal cord injury"*, American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation Vol. 91, pp. 911-921, (2012)
[8] K. A. Strausser, H. Kazerooni, The development and testing of a human machine interface for a mobile medical exoskeleton, in: Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on, IEEE, 2011, pp. 4911–4916.
[9] Kazerooni H., Steger R., *"The berkeley lower extremity exoskeleton"*, Journal of dynamic systems, measurement, and control Vol. 128, pp. 14-25 (2006)
[10] Guizzo E., Goldstein H., *"The rise of the body bots [robotic exoskeletons]"*, Spectrum, IEEE Vol. 42, pp. 50-56, (2005)
[11] Walsh C., Endo K., Herr H., *"A quasi-passive leg exoskeleton for loadcarrying augmentation"*, International Journal of Humanoid Robotics Vol. 4, pp. 487-506 (2007)
[12] Lugo G., *"Diseño de mecanismos utilizando algoritmos genéticos con aplicación en prótesis para miembro inferior"*, Tesis de Doctorado, Instituto Politécnico Nacional, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, ESIME Unidad Profesional Zacatenco, 223p., (2010)
[13] Viladot, R., Cohi, O. y Clavell, S. "Órtesis y Prótesis del Aparato Locomotor Ed. Masson, (1989)

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

19. Determinación del Grado de movimiento de una persona en estados afectivos

Romero Herrera Rodolfo[1], Rosas Saavedra Martha[2], Domínguez Martínez Yolanda[1].

rromeroh@ipn.mx;

Escuela Superior de Computo (ESCOM) del IPN Unidad Profesional Adolfo López Mateos (Zacatenco); México D.F. [1], Instituto tecnológico de Estudios Superiores de Zamora[2] México, Michoacán

Resumen

La simulación de estados afectivos en Robots sociales en un tema aun de relevancia si consideramos que para que sea realmente inteligente una maquina esta debe poseer comportamiento que dependan de las emociones. En el presente artículo se ataca el análisis de la cantidad de movimiento generado en seres humanos con la intensión de que en un trabajo a futuro puedan ser implementadas en Robots sociales. Para logra dicho análisis se empleó un dispositivo Kinect debido a las herramientas que posee; tales como el uso de cámara infrarroja y software que permite el aislamiento y análisis del cuerpo humano mediante Joints, los cuales son puntos que nos representan la unión de las articulaciones. El software permite además la generación de frames que permiten medir la diferencias entre cada uno de ellos lo que nos da una medida de las variaciones entre ellos. Se obtiene un grafica con cinco emociones básicas y un estado neutro. A partir de la gráfica se determinan 3 grupos que clasifican las emociones según su cantidad de movimiento. Con la finalidad de comprobar los grados de movimiento y los grupos formados se diseñó un Robot hasta la cintura, por lo que se incluye el diseño de la cabeza, el pecho y los brazos.

Palabras clave: Cantidad de movimiento, Kinect, estados afectivos, Joints, Robot.

1. Introducción

El lenguaje corporal es el medio por el cual los seres humanos llegan a transmitir muchos de los sentimientos que no pueden expresar con palabras, por lo que es posible que solo observando los movimientos de las personas se pueda determinar cuál es su estado de ánimo actual [1].

Algunos aspectos que se deben observar son el torso, el estiramiento y la inclinación, del movimiento de los brazos, el grado de apertura o de cierre, la velocidad entre otras cosas [2].

El *Kinect* es un sensor que cuenta con dos cámaras, una cámara IR y una RGB, además cuenta con una fuente especial de luz infrarroja y cuatro micrófonos, tal como se muestra en la Figura 1 [3].

Gracias a la plataforma de hardware con la que el *Kinect* cuenta, es posible utilizar por medio de Software la capacidad de *Skeleton*.

El *Skeleton* del *Kinect* es un modelo representativo del cuerpo humano, que está expresado por puntos llamados *Joints* (Figura 2) que pueden ser usados para analizar poses y realizar un seguimiento al cuerpo.

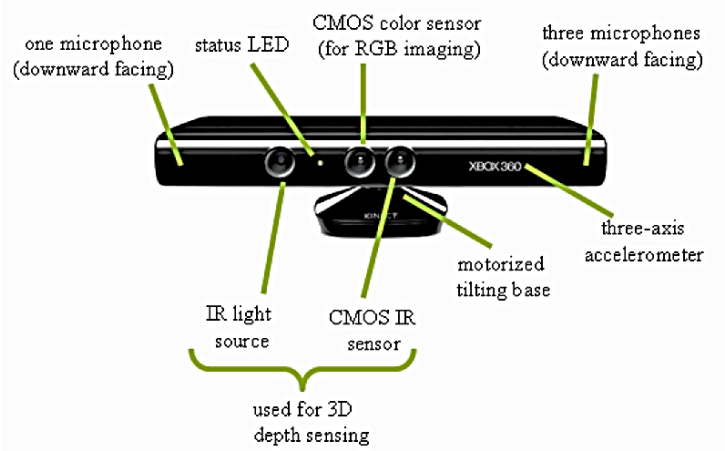


Figura 1. Dispositivo Kinect [4]

La problemática a tratar es como determinar los estados de ánimo usando la capacidad de *Skeleton* de un *Kinect*.

Los robots sociales son un problema aún sin resolver sobre todo si su forma asemeja a un humano. Los movimientos de los Robots deben ser naturales y acorde con las emociones humanas [5][6]. Para poder implementarlas es necesario primero analizarlas. Aquí se emplea una cámara Kinect para realizar dicha tarea. El individuo ubicado frente a una cámara se mueve cómo habitualmente lo hace y después nos dice que emoción expresa.

Se hizo uso de la capacidad de Skeleton que Kinect ofrece, realizando un seguimiento de los movimientos corporales, con el fin de reconocer características asociadas a un estado afectivo. El Kinect es un sensor que cuenta con dos cámaras, una cámara IR y una RGB, además cuenta con una fuente especial de luz infrarroja y cuatro micrófonos. El sensor de profundidad del Kinect produce un patrón de puntos que después es leído de vuelta, convirtiendo la intensidad en distancias. Gracias a esto, es posible realizar un seguimiento a los movimientos corporales de las personas utilizando Software y la capacidad de Skeleton que el sensor Kinect ofrece [6].

El Skeleton es un modelo representativo del cuerpo humano que nos da Kinect y está representado por puntos llamados Joints, tal como se puede observar en la Figura 2 descrita en la metodología [7].

De cada uno de estos puntos se pueden extraer sus coordenadas 3D (x, y, z), y después usar esos datos para analizar poses, realizar un seguimiento al cuerpo e incluso, obtener información sobre la velocidad, fluidez y cantidad de movimiento [8]. En el presente trabajo se optó por emplear el análisis de los movimientos durante un intervalo de tiempo.

2. Metodología

2.1 Arquitectura del sistema

En la figura 2 se puede observar cómo funciona el sistema. De la imagen captada mediante el sensor Kinect se obtienen sus Joint a través del esqueleto que se produce. A partir de los puntos

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

generados se obtiene la cantidad de movimiento generada en un determinado número de frames. Previamente se ha creado una base de datos con Joints que corresponden a determinados movimientos de cada uno de los cinco estados básicos afectivos y el estado neutro. La cantidad de movimiento generada se compara con la base de datos para determinar el estado afectivo.

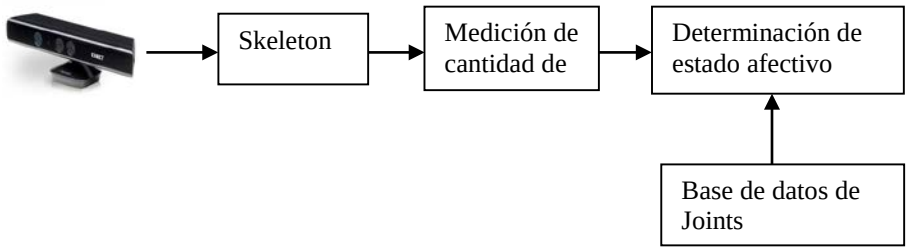


Figura 2. Sistema de adquisición

Hay algunas poses corporales que se encuentran asociadas a ciertas reacciones emocionales; según estudios psicológicos y sociales se ha demostrado que la parte superior del cuerpo especialmente brazos y cabeza juegan un rol importante en las expresiones [9].

Por ejemplo, el temor hace que el cuerpo se contraiga en un intento de ser tan pequeño como sea posible, la sorpresa hace que el cuerpo se torne hacia el objeto porque está capturando tu atención, la alegría provoca que los movimientos tengan mayor apertura y aceleración de los antebrazos hacia arriba. El hecho de que el cuerpo tienda a girar hacia afuera es un signo de miedo y tristeza, mientras que cuando el cuerpo está directamente de frente es signo de felicidad, ira o sorpresa; La velocidad de los movimientos también está asociada al estado emocional, dado que los movimientos lentos denotan tristeza y los rápidos miedo, felicidad, ira o sorpresa [10].

2.2 Skeleton

Para los movimientos del cuerpo, se tiene que observar las siguientes características (Ver Figura 3) [11][12]:

- Distancia de la mano con respecto a la Espina.
- Aceleración máxima de la mano y codo con respecto a la Espina.
- Angulo entre cabeza, el centro de los hombros y espina.
- Angulo entre hombro, codo y muñeca [13].

De tal manera que llevado a los *Joints* se obtendría [14]:

- Energía cinética, contracción, periodicidad, dirección del movimiento y simetría general.
- Joint del Torso. Velocidad de la inclinación y la inclinación.
- Joint de la cabeza: Velocidad, Aceleración, velocidad de la Inclinación,
- posición, Simetría.
- Joint de la (s) mano (s): Distancia entre las manos, Suavidad, Velocidad, Aceleración, periodicidad, Dirección, Fluidez, impulsividad, la curvatura de la trayectoria, Distancia de la articulación del torso, la distancia de la cabeza.
- Joint de hombros o codos: Velocidad, Aceleración, Fluidez, Dirección, Periodicidad, La curvatura de la trayectoria, la distancia desde el torso (codos solamente).

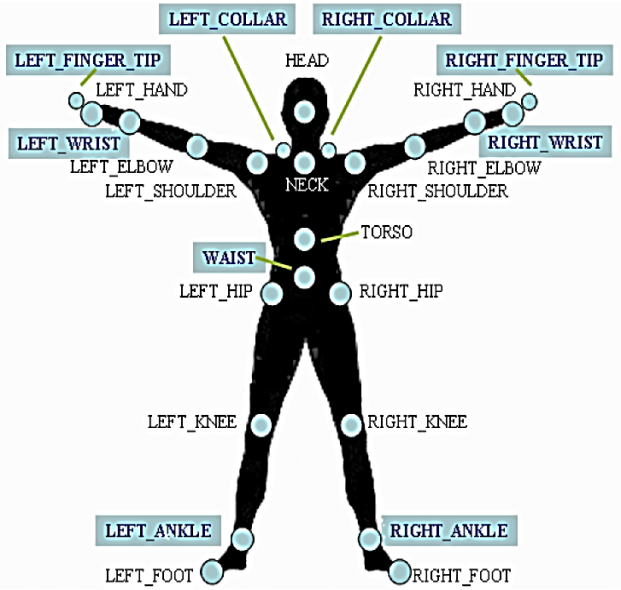


Figura 3. Joints que conforman el Skeleton [15].

Haciendo uso del lenguaje de programación Java, y con apoyo de los programas OpenNI, Nite y SensorKinect para el correcto manejo de los sensores que Kinect proporciona, se desarrolló un programa que genera un Mapa de Profundidad en escala de grises y que cada vez que una persona es reconocida, el contorno de su cuerpo adquiere un color distinto.

2.3 Cantidad de Movimiento

La cantidad de movimiento (QoM) es la actividad del cuerpo o de una parte de él. Haciendo uso del Skeleton proporcionado por el Kinect, se hace una sumatoria de los desplazamientos de cada joint entre dos frames.

$$QoM_{skel}(i) = \sum_{j \in joints} \sqrt{\left(v_{ji} - v_{ji-1}\right)^2} \quad (1)$$

Donde i es el índice del frame y v_{ji} es la posición 3D del joint j en el i-esimo frame.

La detección de periodos de alta actividad y cambios de postura se obtienen analizando los resultados de QoM por cada frame [16].

Este indicador se detecta en tres partes del cuerpo; la cabeza, cara y manos. Para determinar si una persona está tocando esas partes del cuerpo, es necesario medir la diferencia entre las posiciones 3D de los Joints proporcionados por el Skeleton.

Una ventaja en el reconocimiento del movimiento es que es un método biométrico que se basa en la identificación biológica o de comportamiento; características similares a las de las huellas dactilares o reconocimiento facial. Sin embargo, se debe aprovechar las características de movilidad del dispositivo; ya esto mejora su usabilidad al realizarse una auto verificación constante y en tiempo real.

2.4 Con el uso de video RGB (IQoM)

Corresponde al número de pixeles que han cambiado entre frames sucesivos [17].

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

$$QoM_{video}(i) = Card(\{p_i \mid abs(p_i - p_{i-1}) > t\}) \quad (2)$$

Donde p_i es el vector RGB de pixeles p por el $i - esimo$ frame y t el umbral.

2.5 Detección de periodos de alta actividad y cambios de postura

Usando los resultados de QoM por cada frame, se extraen los periodos de alta actividad y se calcula [11]:

- El número de periodos (HAPC)
- La duración media (HAPMD)
- La intensidad media (HAPMV)

Por cada cima, se analizan el primer y último frame para determinar si la persona ha cambiado su postura (PCC).

2.6 Detección de auto-tocado

Cabeza

Para determinar si una persona está tocando su cabeza, se calcula la distancia entre los joints de mano, cabeza y cuello.

Manos

Como el Skeleton proporcionado por el Kinect puede ser impreciso en cuanto a la posición de los Joints, también se puede optar por la detección de piel; es decir, partiendo de la posición del Joint, se busca el pixel más cercano donde se haya detectado piel.

También se obtendrá el QoM de cada mano, extrayendo una sub-imagen usando la posición detectada.

2.7 Estado afectivo y base de datos

Para el modulo que determina el estado afectivo, se realiza el cálculo de una distancia euclidiana o de Mahalanobis entre la cantidad de movimiento y la datos de una base generada con anticipación [18]. Aquí se puede usar distintos umbrales, lo cual depende de cada individuo debido a todas las personas tienen diferentes características morfológicas.

3. Resultados

3.1 Pruebas con el Kinect

Las pruebas se realizaron basadas en los movimientos corporales que surgen en una persona que expresa un estado afectivo. En la figura 4 se puede observar la imagen captada y los Joints generados por la cámara Kinect. Es fácil ver que solo el cuerpo humano es presentado y por lo tanto se analiza de mejor forma la cantidad de movimiento o QoM.

La figura 5 muestra el resultado cuando no hay personas frente a la cámara. Es factible ver que carecen de forma los joints.

La figura 6 nos muestra una joven frente a una camara con poca luz ambiental. La cámara al ser de tipo infrarrojo capta sin dificultad la información. Se pueden observar tres poses diferentes.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

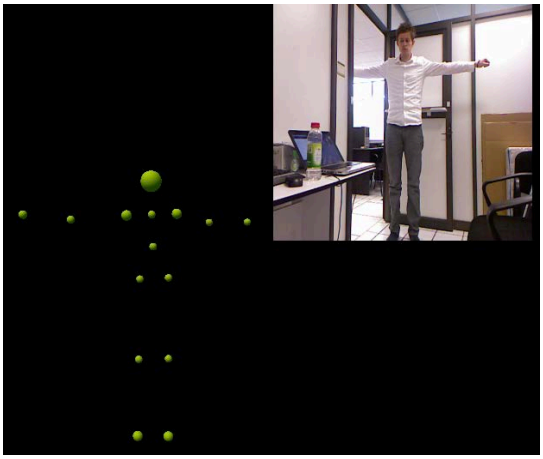


Figura 4. Imagen captada por Kinect que muestra los Joints.

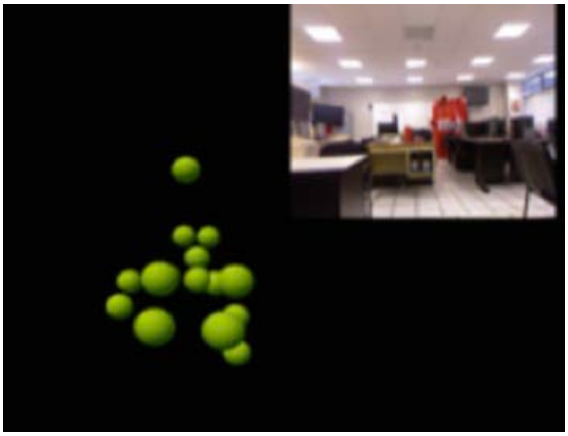


Figura 5. Sin persona frente a la cámara

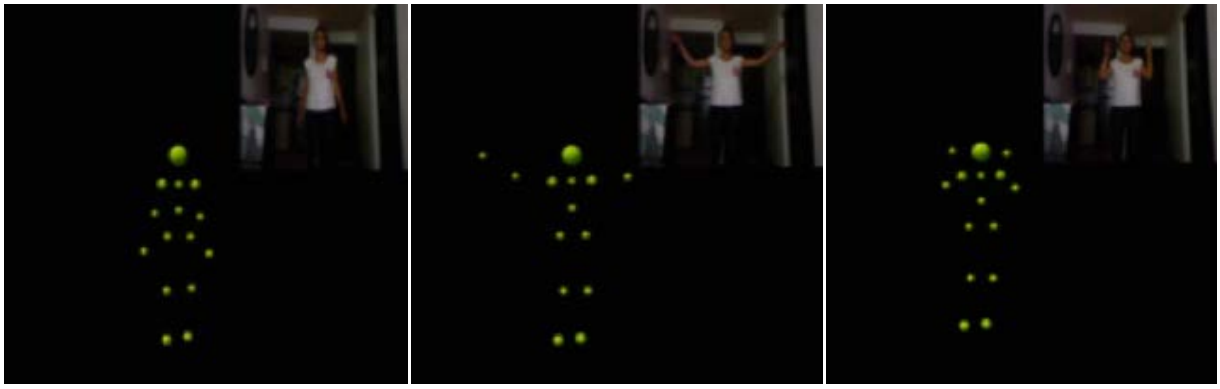


Figura 6. Imagen con poca iluminación.

De igual forma se realizaron pruebas con la iluminación habitual del laboratorio. En la figura 7 se muestran 4 tomas.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

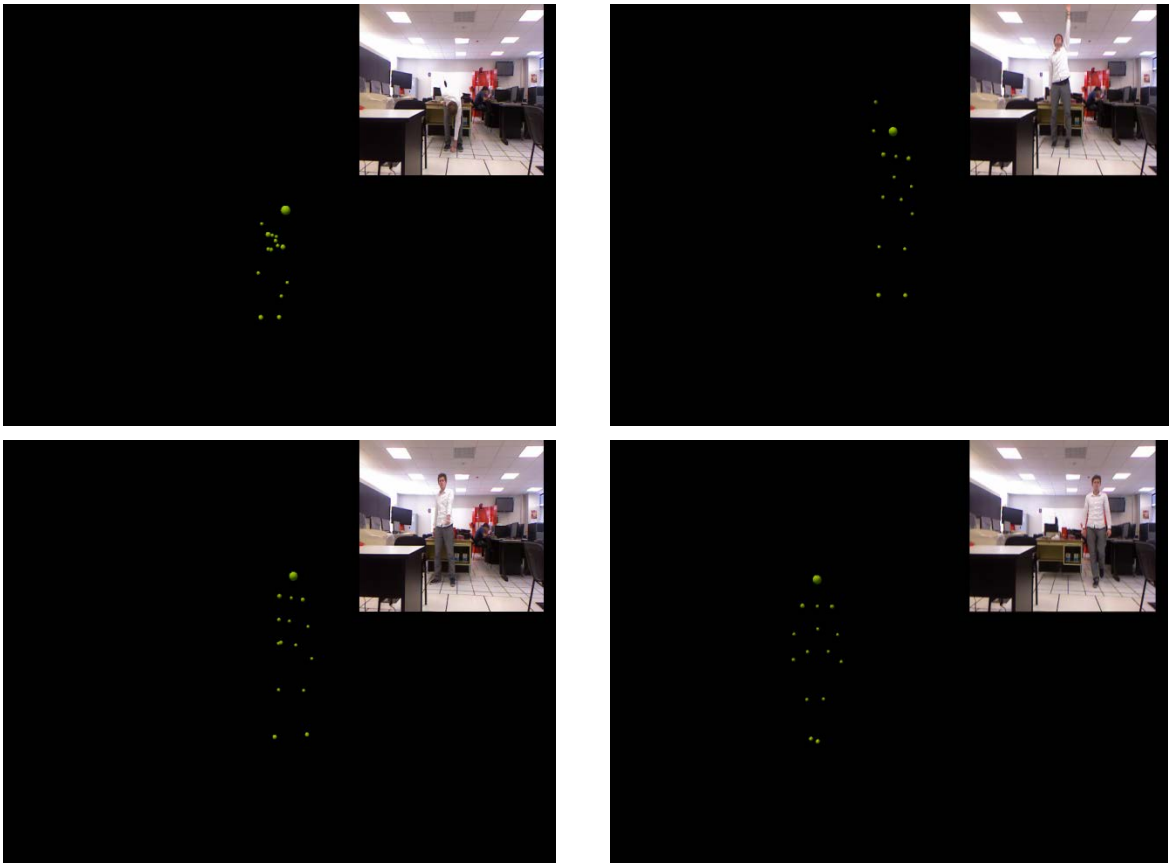


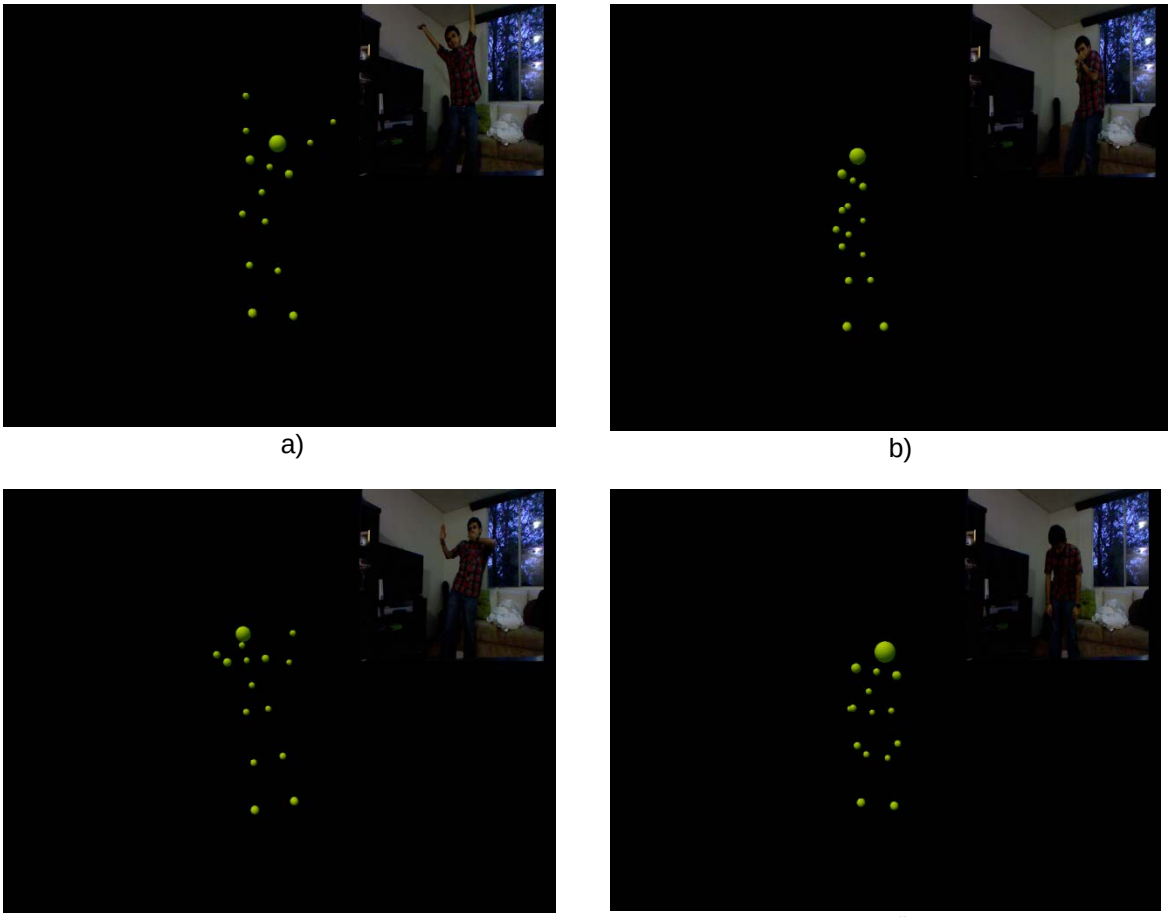
Figura 7. Imágenes con iluminación estándar.

La figura 8 muestra a una joven y aunque no está totalmente captada su figura, el sistema puede identificar las partes captadas del cuerpo.

Figura 8. Imagen parcial

En la figura 9 se muestran algunas expresiones afectivas. En la imagen a) se observa una persona alegre, en la imagen b) una temerosa, en la c) una sorprendida y en la d) una triste.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015



a) b) c) d)

Figura 9. Expresiones emocionales

3.2 Cantidad de Movimiento

Se computarizo la cantidad de movimiento en cada sesión representativa de una emoción y se obtuvieron los resultados presentados en la gráfica de la figura 10. La felicidad muestra la mayor cantidad de movimiento (5000) y la tristeza el menor nivel (prácticamente cero). El miedo y la sorpresa se ubican entre cero y 3000 pero la mayor parte del tiempo medido está en la mitad de la gráfica, mientras que el estado neutro está en ligeramente por encima de los niveles de la tristeza.

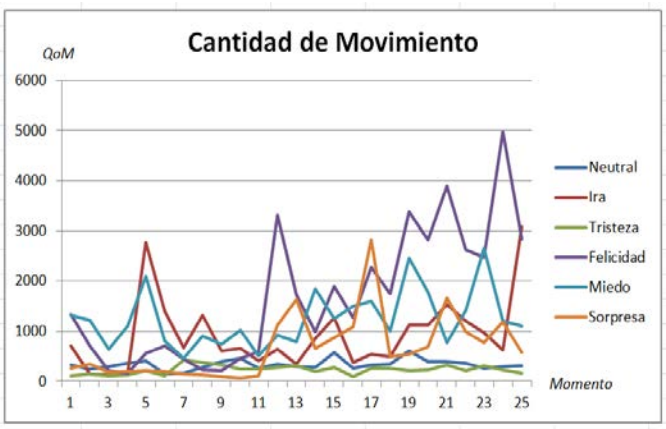


Figura 10. Cantidad de movimiento en cada estado afectivo.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

3.3 Diseño del Robot

Una vez determinada la cantidad de movimiento se debe implementar el robot considerando dichas magnitudes. Así se diseñó un modelo en solidwork. El humanoide solo se diseñó hasta la cintura debido a que los datos obtenidos fueron capturados en su mayoría en esta zona.

SolidWorks es un software CAD (diseño asistido por computadora) para modelado mecánico en 3D, desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp. El programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción. Cuenta con una vasta lista de materiales y funciones lo que permite realizar cualquier proyecto [19].

La figura 11 muestra al robot en una vista en Angulo. Es factible observar su cabeza, hombros, brazos, pecho y manos.

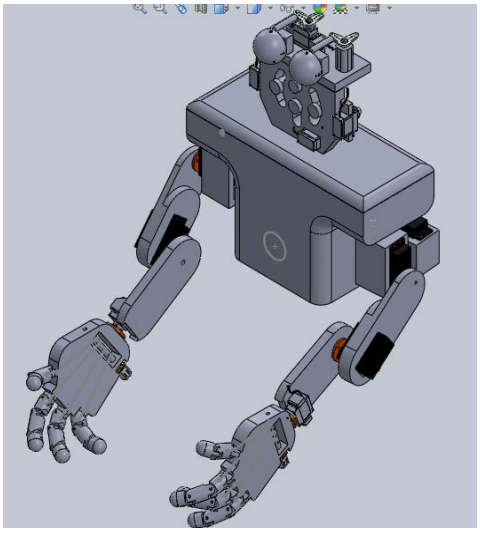


Figura 11. Vista angular del Robot

La vista frontal nos permite ver el mecanismo que mueve la boca y que básicamente está formada por un círculo. El mecanismo de la boca consta de un ensamble de 7 piezas diferentes unidas a una estructura principal, obteniendo un máximo de 3 grados de libertad y tendrá unas dimensiones de 106mm X 85mm X 35mm. En total la estructura está constituida por 13 piezas; Todas ellas de reducidas dimensiones. Ver figura 12.

El mecanismo se imprime mediante una maquina 3D y los resultados son óptimos. Es factible la simulación de emociones para lo cual se desarrolló un software con arduino que proporciona a los motores las indicaciones para los movimientos adecuados de tal manera que exprese las distintas expresiones afectivas corporales.

Por último se muestra la vista lateral y la espalda del robot en la figura 13.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

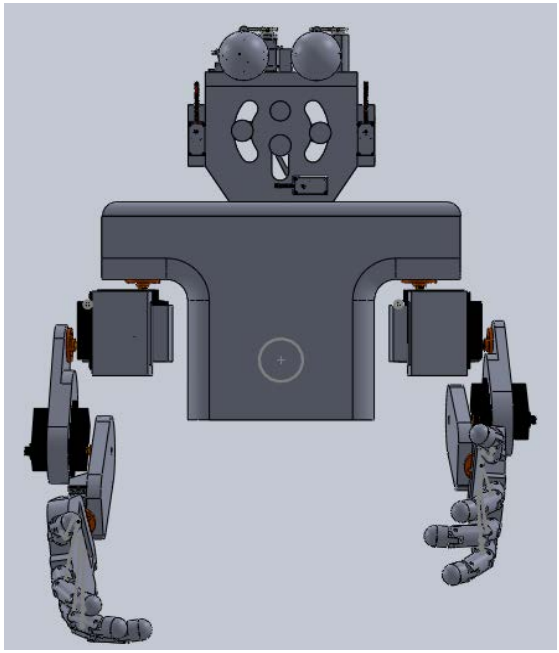


Figura 12. Vista frontal

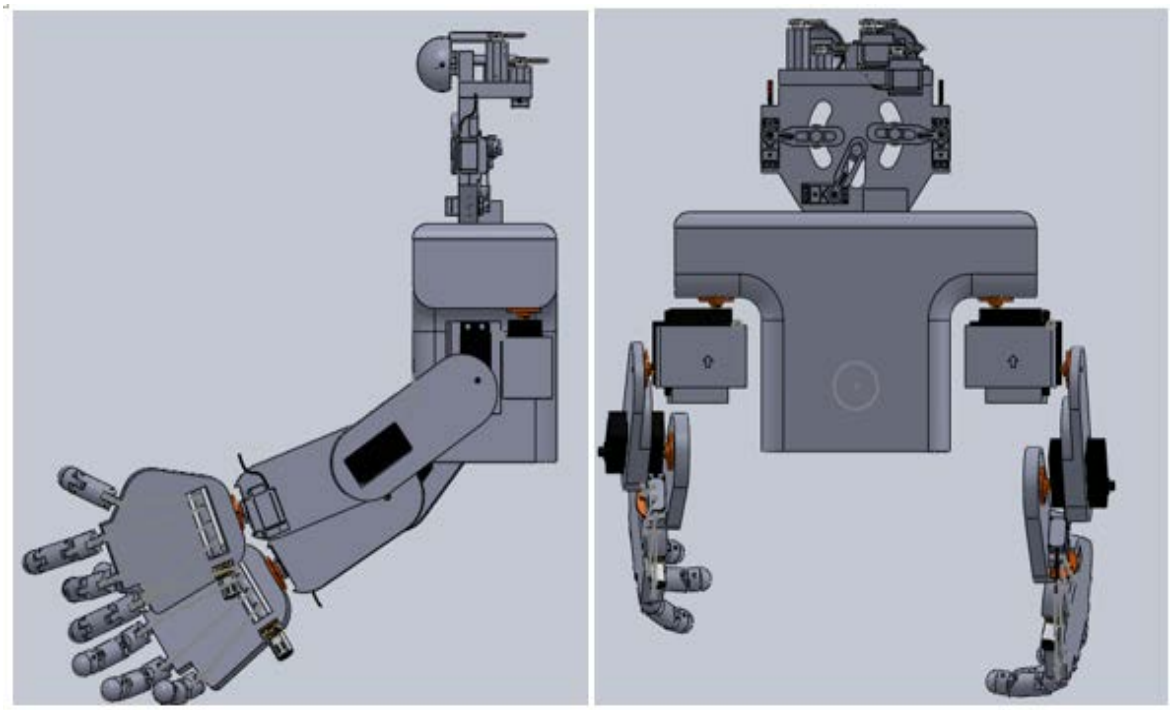


Figura 13. Ensamble completo para un robot afectivo

4. Conclusiones

Es importante reconocer que la tecnología que el sensor Kinect proporciona, abre un panorama extenso a las aplicaciones en el campo del cómputo afectivo, ya que combinado con otros sensores, puede brindar una perspectiva completa y aceptable de las emociones humanas.

Se pueden agrupar en tres grupos a las emociones básicas dependiendo de su cantidad de movimiento; Podemos entonces ubicar el miedo y la felicidad en promedio en un grupo de alto QoM y la Ira y la Sorpresa en un segundo grupo en promedio en la mitad de la gráfica. Así el tercer grupo está formado por el estado Neutral y la tristeza con un nivel bajo de QoM; se puede concluir que una persona triste o en estado Neutro produce movimientos muy ligeros mientras que un persona alegre genera una alta cantidad de movimientos.

La implementación de las cantidades de movimiento obtenidos resultaron optimas ya que se consiguió que el robot las llevará cabo.

Como trabajo a futuro se implementara la simulación de estados afectivos en un robot social humanoide completo considerando la generación de movimientos para expresar comportamiento afectivos según lo concluido. Se considerará el análisis o evolución de movimientos completos en un intervalo de tiempo de varios estados afectivos para simular comportamientos.

5. Agradecimiento

Se hace patente el agradecimiento a la Escuela Superior de Cómputo (ESCOM) y al Instituto Politécnico Nacional (IPN) por el apoyo recibido para la realización de este proyecto.

Referencias

[1] Weiyi Wang, Valentin Enescu, Hichem Sahli; Towards Real- Time Continous Emotion Recognition from Body Movements; Human Behavior Understanding; 4th International Workshop; 235 – 257; Barcelona, Spain; 2013.
[2] Michelle Karg, Ali-Akbar Samadani, Rob Gorbet, Kolja Kühnlenz, Jesse Hoey, Dana Kulic; Body Movements for Affective Expression: A Survey of Automatic Recognition and Generation; IEEE Transaction on Affective Computing, Vol 4, No. 4; USA; 2013.
[3] Abhijit Jana; Kinect for Windows K Programming Guide; Packt Publishing; UK; 2012.
[4] Andrew Davison; Kinect Open Source Programming Secrets (KOPS), McGraw Hill, 2012.
[5] C. Doblado, E. Mogena, F.Cid, L. V. Calderita, P. Nuñez; RGB-D Database for Affective Multimodal Human-Robot Interaction, WAF XIV Workshop ofPhysical Agents; 2013.
[6] Nguyen-Duc-Thanh N. et al (2011) New Approach for Human-Robot Interaction Using Human Body Language.
[7] Saha S. et al. (2014) A Study on Emotion Recognition from Body Gestures Using Kinect Sensor. April 2014.
[8] Ginevra Castellanos, Santiago D. Villalba, Antonio Camuirri; Recognising Human Emotions from Body Movements and Gesture Dynamics; Springer-Verlag; Berloin Heidelberg; 2007.
[9] Marco de Meijer; The contribution of Gneral Features of Body Movement to the Attribution of Emotion; Journal of Nonverbal Behavior; Netherlands; 1989.
[10] Daniel Bernhardt; Emotion inference from human body motion; Technical Report University of Cambridge; 2010.
[11] Piana E. et al. (s.f.) A set of Full-Body Movement Features for Emotion Recognition to Help Children affected by Autism Spectrum Condition.
[12] Human Behavior Understanding, 4th International Workshop, HBU 2013 Barcelona, España. Pag. 235
[13] Zacharatos H. el al (s.f.) Automatic Emotion Recognition Based on Body Movement Analysis. A survey.

[14] Jared St. Jean; Kincet Hacks Tips & Tools for Motion and Pattern Detection; O´Reilly Media Inc; USA; 2003.
[15] Davison A; Kinect Open Source Programming Secrets: Hacking with OpenNI, NITE, and Java; JavaOne; USA; 2012.
[16] Takayuki Kanda , Hiroshi Ishiguro , Michita Imai , Tetsuo Ono, Body movement analysis of human-robot interaction, Proceedings of the 18th international joint conference on Artificial intelligence, p.177-182, August 09-15, 2003, Acapulco, Mexico
[17] Sanghvi J, Castellano, G. ; Leite, I. ; Pereira, A. ; McOwan, Peter W. ; Paiva; Automatic analysis of affective postures and body motion to detect engagement with a game companion; Human-Robot Interaction (HRI), 2011 6th ACM/IEEE International Conference on; Lausanne, Switzerland; 2011
[18] Maria Teresa Escobedo Portillo, Jorge A. Salas Plata Mendoza; P, CH. Mahalanobis y las aplicaciones de sus distancia estadística; Culcyt //Estadistica Cultura Científica y Tecnológica; Num 27 (5); México; 2008.
[19] Dassault Systems; www.solidworks.es/; año de consulta 2015.

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

20. Diseño e implementación de un sistema de instrumentación para el monitoreo estructural del Acueducto de Querétaro

Hernández Figueroa Jorge Alberto, Crespo Sánchez Saúl Enrique, Quintana Rodríguez Juan Antonio, Martínez Álvaro Luis, Gasca Zamora Héctor.

jhernandez@imt.mx;

Instituto 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

El acueducto de la ciudad de Querétaro es un monumento histórico emblemático que corre a lo largo de una de las avenidas más importantes de la ciudad y cruza con otra avenida principal. Para satisfacer las necesidades del tráfico reales sin causar efectos importantes en el acueducto, las autoridades de la Ciudad de Querétaro desarrollaron un importante proyecto para aumentar a partir de dos carriles de tráfico a tres en los túneles que circulan debajo del Acueducto. Este proyecto incluyó modificaciones importantes en la cimentación del monumento para ganar espacio para el incremento del carril adicional, para añadir rigidez y reducir la vibración. Con el fin de limitar los niveles de vibración y prevenir daños durante los trabajos de construcción se diseñó un sistema de monitoreo estructural, el cual fue diseñado en una configuración híbrida, que incluyó 16 piezoeléctricos y capacitivos acelerómetros y fibra óptica instrumentación con sensores de tipo FBG que involucró a 8 inclinómetros, 15 sensores de tensión, 12 acelerómetros y 1 sensor de temperatura. El monitoreo se realizó durante 5 meses y el sistema fue diseñado con un sistema de alarma para detectar condiciones críticas para acciones correctivas, e incluyó el análisis de la vibración para evaluar el efecto de los cambios en el comportamiento estructural del acueducto. Para lograr lo anterior, se desarrolló una plataforma de análisis y visualización de las variables recabadas en el sistema basado en la plataforma de desarrollo Labview. Los resultados mostrados en el presente artículo, muestran la importancia y el éxito que tienen la aplicación de sistemas de instrumentación virtuales basados en tecnologías emergentes como los sensores FBG y sensores eléctricos en el monitoreo estructural, dando lugar al desarrollo de nuevas técnicas, para preservar la integridad de estructuras importantes como lo son los monumentos históricos.

Palabras clave: Instrumentación, Fibra Óptica, Sensores Piezoeléctricos, Monitoreo Estructural, Monumentos Históricos.

1. Introducción

La preservación de sitios y monumentos históricos es de suma importancia debido al gran aporte cultural e histórico de los mismos en nuestras sociedades, por tal motivo, en la actualidad, el uso de técnicas y tecnologías para su conservación es cada vez más frecuente, gracias al surgimiento de campos multidisciplinarios entre los cuales se encuentra el monitoreo estructural (Structural Health Monitoring, SHM), el cual tiene como objetivo verificar el comportamiento in-situ de sistemas

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

estructurales, para evaluar su desempeño a distintas cargas de servicio, para detectar daño o deterioro y predecir vida útil remanente en estos sistemas.

Ante los bajos niveles de servicio, alto flujo vehicular y pérdida de la capacidad vial de la intersección del Boulevard Bernardo Quintana y Avenida de Los Arcos, en la Ciudad de Querétaro, el gobierno del estado planteó la ampliación de los túneles del Boulevard como la alternativa para agilizar la movilidad vehicular de la zona. Para garantizar la integridad del Acueducto se instaló un sistema de monitoreo estructural el cual fue diseñado en una configuración híbrida, que incluyó acelerómetros piezoeléctricos y capacitivos (sistema de monitoreo de sensores eléctricos), así como sensores de fibra óptica tipo FBG para medir inclinaciones, deformaciones, aceleración y temperatura (sistema de monitoreo de sensores ópticos) de la estructura, esta configuración se integró en una sola plataforma de instrumentación virtual, la cual fue capaz de monitorear en el trascurso de la intervención, generando alertas estructurales, reportes periódicos y extraordinarios y dar aviso vía web.

2. Sistema de monitoreo estructural.

El monitoreo estructural tiene como principal objetivo verificar el comportamiento 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 [1]. 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 acueducto de Querétaro se utilizó una configuración híbrida, la cual consistió en la integración de dos diferentes plataformas de instrumentación, sistema de monitoreo de sensores ópticos y sensores eléctricos, con el fin de alcanzar los siguientes objetivos:

1) Medir el nivel de vibraciones en los puntos críticos de la estructura de los Arcos de Querétaro.
2) Advertir, mediante alarmas, la ocurrencia de condiciones de riesgo por niveles excesivos de vibraciones.
3) Generar reportes automáticamente y visualizar vía web la condición del sistema.

2.1 Sistema de monitoreo óptico en el acueducto de Querétaro.

Un sistema de monitoreo óptico está compuesto por los elementos siguientes (figura N° 1) [3]:

a) Red de sensores son los elementos encargados de medir los parámetros relevantes de la estructura a monitorear.
b) El sistema de proceso de datos (PC) es el encargado de transmitir, adquirir y almacenar los mismos.
c) La fuente óptica de luz es la encargada de transmitir las ondas de luz.
d) El circulador permite el paso de la luz en un solo sentido, desde la fuente óptica hacia las estrellas pasivas. A su vez, impide que el espectro de luz reflejado llegue de nuevo a la fuente óptica y sea dirigido hacia el analizador de espectros ópticos (OSA, Optical Spectrum Analyzer).
e) El analizador de espectros es el encargado de la obtención del espectro de luz y sus variaciones en el tiempo.

La fuente óptica de luz, el circulador y el OSA se engloban en un único elemento que recibe el nombre de Interrogador.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

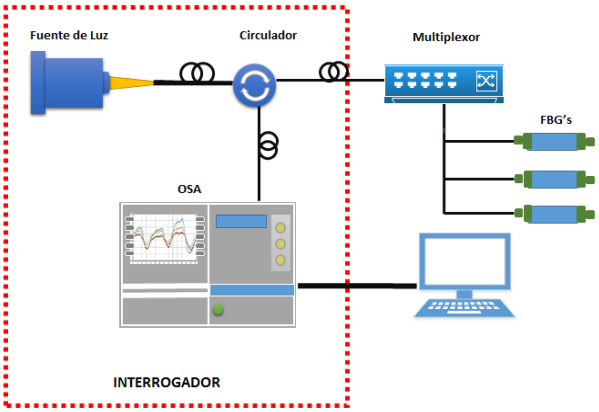


Figura 1. Elementos que forman un sistema de monitorización óptico basado en FBG.

Los sensores ópticos se basan en el uso de la tecnología en fibras ópticas Fiber Bragg Grating (FBG), los cuales trabajan reflejando una longitud de onda de luz que se transmite en respuesta a variaciones en temperatura y/o tensión (figura N° 4). Los sensores tipo FBG se desarrollan usando interferencia holográfica, exponiendo un tramo corto de fibra a una distribución periódica de intensidad de luz, cambiando el índice refractivo de la fibra permanentemente de acuerdo al periodo de luz a la que es expuesto. La variación periódica que resulta en el índice refractivo se llama un FBG (fiber Bragg grating) [7].

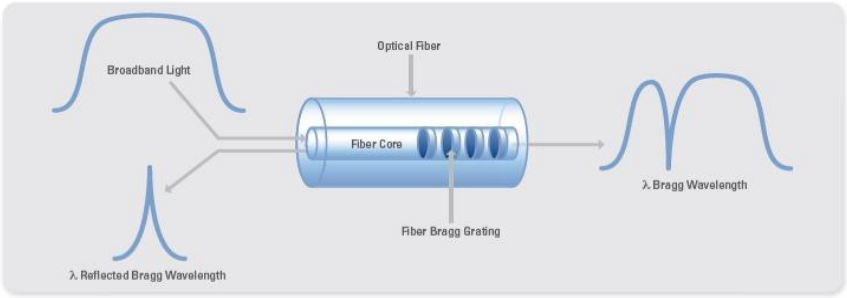


Figura 4. Operación de un sensor óptico FBG [2].

Durante el monitoreo del monumento se instaló una cabina en la cual se albergaron los instrumentos y equipos del sistema. Para el sistema de monitoreo óptico se instaló el interrogador y multiplexor, teniendo las conexiones de los ocho canales de fibra óptica que se planearon según el diagrama de instrumentación. Los elementos que conformaron el sistema óptico fueron (figura N° 2): 16 acelerómetros con una sensibilidad de ~16pm/g trabajando en un rango de temperatura de -40 a 80 °C, 8 inclinómetros los cuales tienen un rango de operación de ±3 grados, una sensibilidad de ~450 pm/grado trabajando en un rango de temperatura de -20 a 80°c, 15 extensómetros que cuentan con una sensibilidad de ~1.2pm/με trabajando en un rango de temperatura de -40 a 80 °C teniendo como límite 5000 με, por último, el sistema de adquisición consistió en un interrogador de detección óptica. El interrogador emplea detección de picos por hardware de alta velocidad, optimizado para la adquisición rápida de datos de muchos sensores simultáneamente.

Todos los ajustes del módulo, los cálculos del sensor, visualización de datos, almacenamiento y tareas se ejecutan en un PC externo. El interrogador cuenta con 4 canales ópticos con una frecuencia de escaneo máxima de 1KHz trabajando dentro de un rango de longitud de onda de 1510 a 1590 nm. Para la conexión de más de 4 canales ópticos se utilizó en multiplexor óptico con una frecuencia de muestreo de 125Hz. Todos estos equipos y sus conexiones se esquematizan en la figura N°.

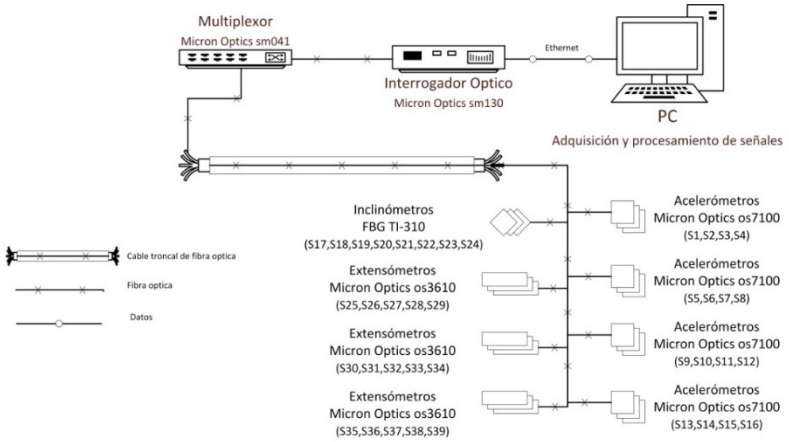


Figura 2. Diagrama de conexión del sistema de instrumentación óptico.

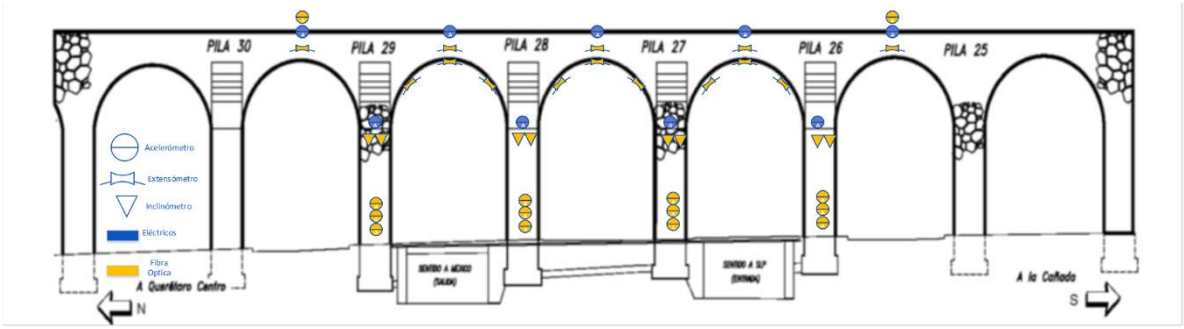


Figura 3. Esquema de instrumentación.

El conjunto de sensores ópticos que conformaron el sistema de monitoreo hibrido se instalaron en diversas zonas del acueducto (figura N° 3), desde la cabina de monitoreo hasta la zona de intervención donde se colocó un cable troncal de fibra óptica hasta las partes superiores de las pilas donde la intervención de la obra civil se desarrolló con el fin de darle seguimiento a las inclinaciones y aceleraciones registradas durante las etapas de perforación y movimiento de tierras, los centros de claros de los arcos intervenidos para medir deformaciones en el sistema, producto de las diversas maniobras de la obra civil.

2.2 Sistema de monitoreo de sensores eléctricos

Se colocaron 12 acelerómetros (figura N° 5) piezoeléctricos y capacitivos de alta sensibilidad, para medir vibraciones en los puntos críticos de la estructura de los arcos.

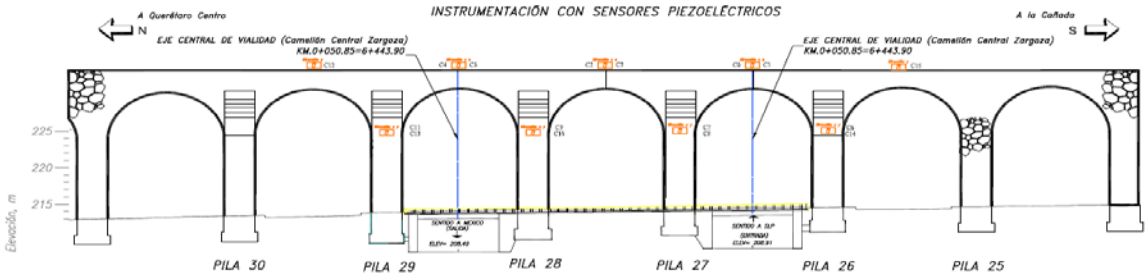


Figura 5. Esquema de instrumentación sensores electricos.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Se utilizaron 6 sensores piezoeléctricos que cuentan con una sensibilidad de 1500 mV/g midiendo la aceleración en un solo sentido dentro de un rango de ±3g, estos sensores ocupan un acondicionamiento de señal que proporciona la corriente de excitación constante requerida, la alimentación del sensor es suministrado por el mismo cable de dos hilos que proporciona la señal de salida de baja impedancia.

Parte de la configuración de conexión para la adquisición de señales constó de un multiplexor (National Instruments modelo BNC-2090), el cual recaba las señales para que la tarjeta de adquisición (National Instruments modelo DAQCard-6062E) las interprete y, por medio de la plataforma desarrollada, se almacenen y procesen. La esquematización de las conexiones se aprecia en la figura N° 6.

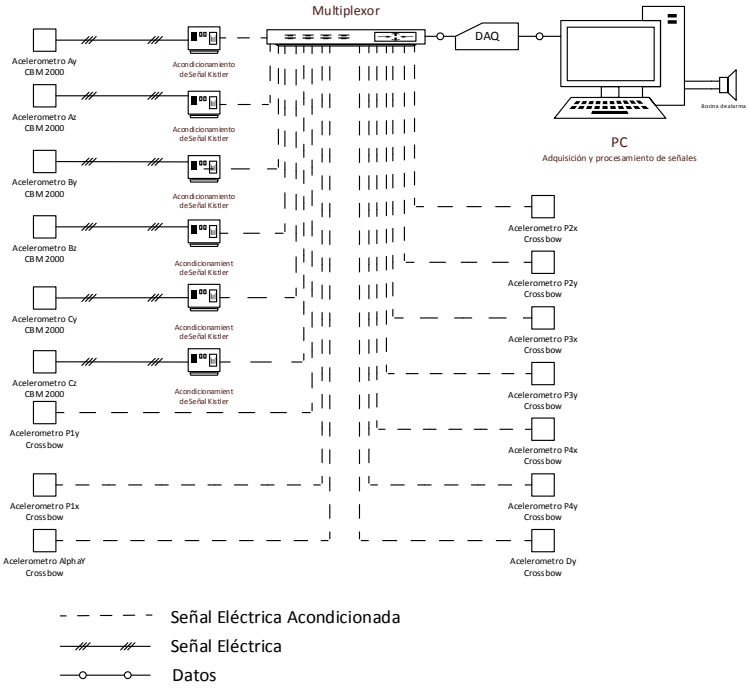


Figura 6. Diagrama de conexión del sistema de instrumentación electrico.

El otro conjunto de acelerómetros son capacitivos de la marca Crossbow, modelo CXL01LF1, de un solo eje, el acelerómetro opera 6-30 VDC de alimentación. El sensor proporciona una salida de señal directa la cual no requiere acondicionamiento de señal externo y es sencilla su conexión a los sistemas de adquisición de datos estándar midiendo en un rango de ±1g con una sensibilidad de 2 V/g. Este conjunto de sensores piezoeléctricos y capacitivos, por su alta sensibilidad, fue colocado en las zonas más críticas del canal del acueducto, ubicados en los centros de claro de cada arco intervenido, estos fueron colocados para medir aceleraciones en las direcciones longitudinal y transversal del monumento.

3. Instrumentación del sistema de monitoreo

Como se mencionó para el sistema de monitoreo óptico se instalaron 16 acelerómetros, 8 inclinómetros y 15 extensómetros de fibra óptica. Se instalaron de manera estratégica en puntos clave del monumento.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

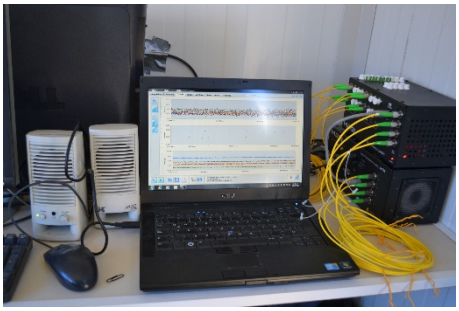


Figura 7. Equipo de adquisición del sistema de instrumentación óptico.

Para las conexiones de los sensores al equipo de adquisición de datos se desplegó un cable troncal de 12 fibras a lo largo del canal del acueducto (figura N° 8) hasta la cabina de monitoreo. Se distribuyeron los sensores en diferentes canales, los cuales se conectaban al cable troncal a través de cajas de empalme.

Figura 8. Tendido de cables en el canal del acueducto.

Los acelerómetros de fibra óptica se instalaron en arreglos uniaxiales y triaxiales (figura N° 9 a). Los extensómetros de fibra óptica fueron colocados de acuerdo al plano de instrumentación a los centros de claro y a un cuarto del claro total de los arcos del acueducto (figura N° 9 c), esto con el fin de medir las deformaciones unitarias en estos puntos y visualizar así la distribución de deformaciones en los arcos intervenidos.

Figura 9. Sensores de fibra óptica, (a) Acelerómetros FBG, (b) Inclinómetros FBG, (c) Extensómetro

Los inclinómetros se colocaron en pares en las cuatro pilas de los arcos del Acueducto (figura N° 9 b) que fueron intervenidos, su colocación hace posible medir la rotación alrededor de los planos longitudinal y transversal.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

En el sistema de monitoreo de sensores eléctricos para medir el nivel de vibraciones en los puntos críticos de la estructura de los Arcos, se colocaron 12 acelerómetros; 6 piezoeléctricos y 6 capacitivos de alta sensibilidad para advertir, mediante alarmas, la ocurrencia de condiciones de riesgo por niveles excesivos de vibraciones inducidas por la obra de construcción.

Figura 10. Sensores y arneses para el cableado para los sensores eléctricos.

La colocación final de los sensores piezoeléctricos en los arcos puede verse en la figura. Los cables fueron protegidos y el sensor fue fijado con tornillos a una base metálica que a su vez está pegada con material epóxico al monumento (figura N° 11); quedando en pares y midiendo en los ejes longitudinal y transversal al acueducto.

Figura 11. Acelerómetros instalados sobre canal de acueducto.

Todo el equipo de adquisición de señales se montó dentro de una cabina móvil para tener la adquisición continua las 24 horas y proteger el equipo (figura N° 7 y 11).

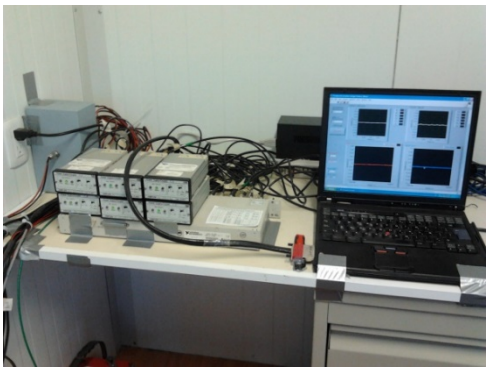


Figura 12. Equipo de adquisición del sistema de instrumentación eléctrico.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

3.1 Integración de los sistemas

Se diseñó una plataforma que permitiera monitorear las señales de cada uno de los sensores instalados y analizarlas para brindar mayor información acerca de los fenómenos registrados. Dicha plataforma desarrollada debió cumplir con los siguientes objetivos:

a) Adquisición y registro de señales.
b) Post-procesamiento de señales.
c) Alarmas de seguridad estructural.
d) Generación de reportes automáticos.
e) Enlace vía página Web.
f) Monitoreo remoto.

La adquisición de las señales para el sistema de monitoreo de los sensores eléctricos se hizo a través de un sistema basado en LabView, el cual se encargaba del primer nivel de procesamiento y almacenamiento de la información.

En la figura 12, se muestra un despliegue de la interfaz de monitoreo en tiempo real desarrollada para la adquisición y visualización de las señales de estos sensores, las señales fueron agrupadas en dos ventanas superiores, en una de ellas, se muestran los sensores instalados en los centros de claros de los arcos (piezoeléctricos) y en otra, aquellos ubicados en la parte superior de las pilas (capacitivos), dejando otras dos ventanas inferiores para visualización de cualquier sensor de interés de manera individual.

Además, se desarrollaron programas de procesamiento de datos y visualización gráfica que mostraron el historial de registros máximos durante el día, los cuales permitieron identificar fácilmente los instantes de aceleración máxima y asociarlos con las etapas constructivas registradas en la bitácora de la obra civil de intervención del acueducto de Querétaro, y así, propiciar la modificación de algunos procesos constructivos durante las etapas de perforación del suelo para el colado de los micropilotes que recimentaron la estructura.

Para el cumplimiento de los protocolos de actuación definidos por las autoridades, se estableció un sistema de semáforos en la interfaz de monitoreo, el cual simboliza los niveles de alarma señalados en los criterios y que se activaban de manera gráfica (figura N° 14) y sonora, alertando la ocurrencia de eventos extraordinarios que sobrepasaban los valores máximos de aceleración y que realizaban un escaneo automático y continuo sobre los registros de todas las señales registradas.

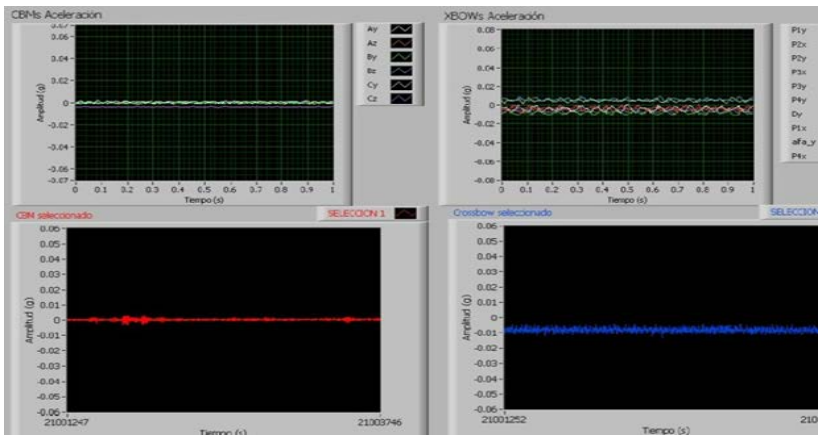


Figura 12. Adquisición de las señales

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

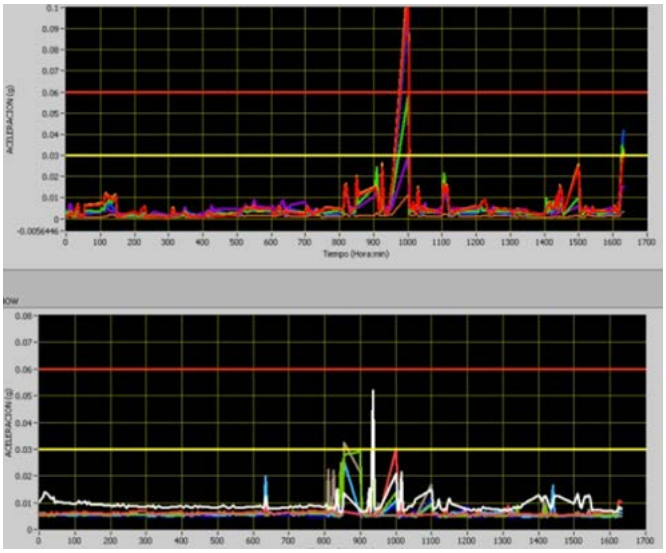


Figura 13. Registros máximos diarios.

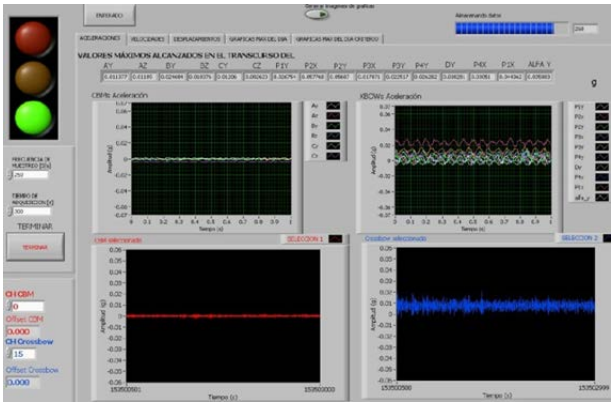


Figura 14. Semáforo de alarmas de seguridad estructural.

Adicional al aviso emitido a las autoridades cuando se alcanzaban valores extraordinarios, se desarrollaron aplicaciones que permitieron emitir reportes escritos de los eventos registrados en tiempo real y de manera automática, además de proporcionar un reporte por día en el que se incluían los tres eventos de mayor relevancia de las últimas 24 horas de monitoreo y un seguimiento de las diversas variables en el tiempo; para ello, fue necesario generar rutinas de post-proceso de los datos en LabVIEW, las cuales generaron concentrados de la información necesaria para la elaboración de los reportes, como magnitudes de aceleración registradas y espectros de frecuencias.

Estos reportes de comportamiento de los sensores se generaban a partir de un formato prestablecido en Excel, estos incluían tres eventos significativos, para cada evento se incluían cuatro gráficas, aceleración, velocidad, desplazamientos y el espectro de frecuencias, además de una tabla resumen de lo que registraron todos los sensores en cada evento reportado. Aunado a este reporte se programaron algoritmos para la generación de reportes extraordinarios, los cuales se generaron al sobrepasar el límite de aceleración máxima permisible para el sistema estructural.

Para la generación rápida de estos reportes fue necesario hacer un post- procesamiento de los datos, sobre los espectros de frecuencias. Para el cálculo de frecuencias, se utilizaron herramientas en LabVIEW las cuales, a partir de la señales adquiridas y utilizando la transformada rápida de Furier

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

calculan los espectros de potencia (Power Spectrum Density) (figura N° 15), mostrando las frecuencias de los modos de vibración del monumento histórico.

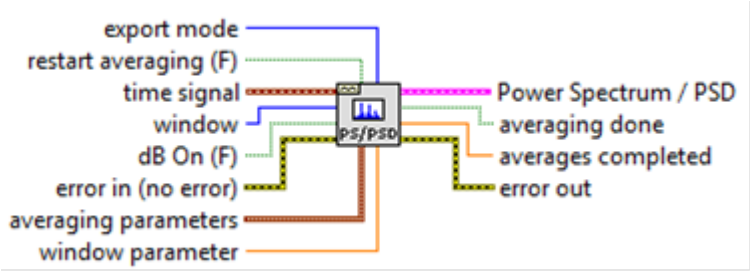


Figura 15. PSD en LabVIEW.

Por otra parte, el proyecto de monitoreo estructural del acueducto requirió del desarrollo de una página web, la cual debía mostrar la información en tiempo real del registro de los sensores, particularmente, los valores máximos de cada 5 minutos a lo largo del día, para lo cual fue necesario exportar los gráficos calculados previamente, para su publicación vía web. Para lograr la visualización en la página Web solo fue necesario exportar las imágenes de las gráficas a un directorio específico, para que el administrador web las publicara. Esto llevó al desarrollo de un algoritmo para reescribir la imagen con el mismo nombre cada 5 minutos para que a través de un hipervínculo se actualizara de manera automática la imagen en el sitio web. Todo esto fue posible utilizando las propiedades de los gráficos en LabVIEW, algunos parámetros necesarios para configurar fueron el tipo de imagen y la ruta, además de que en este caso, se requiere sobrescribir la imagen con el mismo nombre, empleando la opción “Always Overwrite”, como se muestra en las siguientes imágenes.

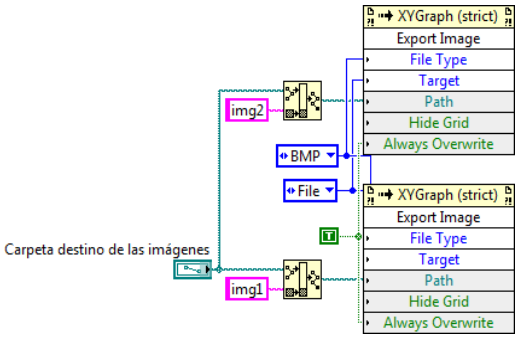


Figura 15. Nodos de propiedad para exportar imagen programáticamente.

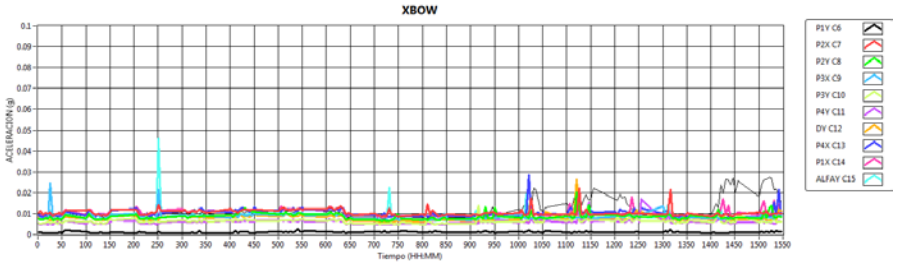


Figura 16. Imagen exportada desde LabVIEW.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Por otra parte, para el conjunto de sensores de fibra óptica, fue necesario logar una adquisición de señales de los sensores FBG y establecer una comunicación con el interrogador a través de Ethernet a través del software llamado Enlight (figura N° 17).

Figura 17. Interfaz de Enlight.

Este software hace posible la comunicación con el interrogador desde una PC, estos deben estar en la misma red de comunicación, ya que para comunicarse se necesita conocer la IP del interrogador. Enlight es capaz de configurar los parámetros de adquisición de señales de los sensores FBG; permite el escaneo y detección en las redes de fibra óptica, además introducir las ecuaciones de calibración de los sensores, el registro continuo de las señales de los sensores y otras funciones.

Se elaboraron diariamente reportes de los registros de las señales, empalmando 3 días consecutivos por reporte diario con el fin de mostrar el seguimiento de deformaciones e inclinaciones en el monumento y evidenciar comportamientos estructurales del Acueducto por efecto de la obra, ciclos térmicos temperatura, tráfico, etc.

Enlight guarda el registro de las señales en blog de notas tabulados en formato *.txt estos archivos están organizados por columnas haciendo referencia a cada sensor, además los archivos se generan en periodos de 2 minutos con una frecuencia de adquisición de 125 Hz, logrando grandes cantidades de información, la cual fue procesada de forma continua para el seguimiento de las variables estructurales.

De la misma manera que el sistema de sensores eléctricos, se requirió la generación de reportes y exportación de datos para su publicación vía web, esto hizo necesario el desarrollo de aplicaciones basadas en LabVIEW, de manera similar a la de los sensores eléctricos la cual calcula la deformación en los extensómetros provocada por los ciclos térmicos que afectan a la estructura de los arcos de las últimas 72 horas, estos gráficos se exportaban a un directorio para su posterior publicación vía web (figura N° 18).

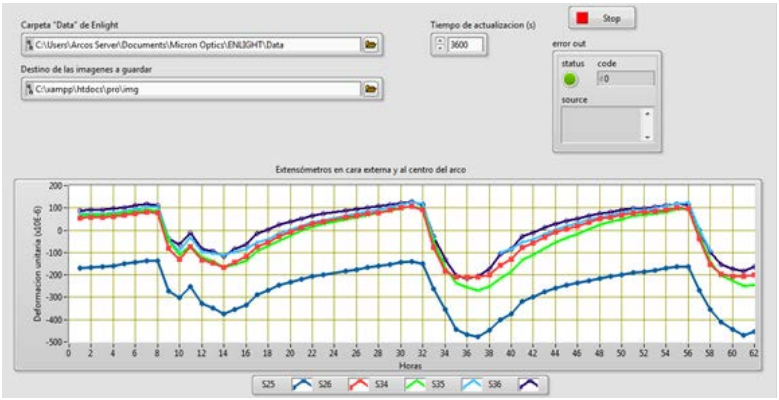


Figura 18. Generador de imágenes de los sensores de fibra óptica.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

4. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, se comprueba que el sistema de monitoreo que se instaló en los arcos del Acueducto de Querétaro, cumplió satisfactoriamente con su propósito fundamental, ya que se identificaron eventos críticos que pusieron en riesgo al monumento histórico.

La integración del sistema desarrollado, por un lado, proporcionó información en tiempo real para actuación inmediata ante condiciones críticas, registros históricos y análisis de la información a la medida. Es un claro ejemplo de la importancia y el éxito que tienen la aplicación de sistemas de instrumentación virtuales basados en tecnologías emergentes como los sensores FBG y sensores eléctricos en el monitoreo estructural, dando lugar al desarrollo de nuevas técnicas, para preservar la integridad de estructuras importantes como lo son monumentos históricos, puentes, edificios y en general, cualquier sistema estructural que requiera un continuo seguimiento de condición, ya sea para realizar una pronta detección de condiciones estructurales anormales, como lo es el caso presentado, o con el fin de evaluar el sistema de manera continua a lo largo de su vida útil y priorizar así, la ejecución de los recursos destinados a su mantenimiento.

Referencias

[1] Crespo S, Carrión F, Quintana J, Hernández F, Alvarado R, Rodríguez D, Gasca H. *"Monitoreo Estructural del Acueducto de Querétaro durante la ampliación del Boulevard Bernardo Quintana"*, Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 418, págs. 67, 2014.
[2] National Instruments. *"Fundamentos de la detección óptica FBG"*, 2010
[3] Torres B. *"Estudio experimental de sensores ópticos tipo FBG para medir deformaciones y temperaturas en estructuras"*, Universidad Politécnica de Valencia, 2009.
[4] Arenas M. *"Diseño e implementación de un sistema de adquisición de aceleraciones con procesamiento mediante un controlador"*, Universidad de Sevilla, 2008.
[5] National Instruments. *"Instrumentación Virtual e Instrumentación Tradicional"*, 2008
[6] Micron Optics. *"Optical fiber sensor guide: fundamentals and applications"*, 2012
[7] National Instruments. *"FBG Optical Sensing: A new Alternative for Challenging Straing Measurements"*, 2011
[8] Navarro F. *"Sensores de fibra óptica FBG para el monitoreo de la salud estructural de los puentes"*, 2012

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

21. Reingeniería de un cuadricoptero

Flores Ceja Guillermo, Solorio Mejía Marcela Yunuen, Alcalá Janeth, Charre Saida, Durán Miguel

janethalcala@ucol.mx;

Facultad de Ingeniería Electromecánica – Universidad de Colima
Carretera Manzanillo – Barra de Navidad Km 20
Manzanillo, Colima, México

Resumen

En este artículo se presenta la reingeniería inversa de un vehículo aéreo no tripulado (UAV, por sus siglas en inglés) del tipo cuadricoptero, se desarrolla un estudio de las etapas que lo integran y se diseña cada una de ellas. Para el procesamiento de datos se utiliza el microcontrolador arduino® mini y se emplea comunicación bluetooth®, con lo cual se crea un enlace entre el UAV y un dispositivo móvil con una plataforma basada en android® que se utiliza para controlar el UAV.

Palabras clave: Reingeniería inversa, vehículo aéreo no tripulado, cuadricoptero.

1. Introducción

El acrónimo UAV es la abreviatura del término inglés *Unmanned Aerial Vehicle*, es decir, vehículo aéreo no tripulado. Los UAV han sido un área de investigación muy activa durante los últimos años, ya que se pueden controlar remotamente o volar de forma autónoma utilizando planes de vuelo pre programados mediante el uso de sistemas de control complejos. En la actualidad son usados en el ámbito militar, por ejemplo en misiones de reconocimiento y ataque a blancos militares. Sin embargo la tecnología de UAV totalmente autónomos se encuentra aún en desarrollo [1].

Los UAV se pueden clasificar en dos categorías según su uso, militar y civil; sin embargo podemos encontrar otros tipos de clasificaciones, por ejemplo por su tamaño y peso: micro (menor a 1 kg); mini (1-10 kg); pequeño (10-50 kg); mediano (50-100 kg) y grande (más de 100 kg). Otra forma de clasificar a los UAV es por su forma de despegue, que permite diferenciar dos grandes grupos: los de despegue vertical, como helicópteros y dirigibles, y los de despegue no vertical, como aeroplanos y parapente. En la tabla 1 se pueden apreciar las distintas clasificaciones de UAV y sus principales ventajas y desventajas.

Al realizar una comparación exhaustiva puede apreciarse como el cuadricoptero cuenta con muchas ventajas, como lo son: buen control, carga útil, simplicidad mecánica, vuelo a alta y baja velocidad, vuelo estacionario. Además, es posible miniaturizarlo y su complejidad aerodinámica es menor en comparación a otros. A estas grandes ventajas se atribuye su constante estudio en la actualidad.

En este trabajo se presentan la reingeniería inversa de un vehículo aéreo no tripulado tipo cuadricoptero, modelo H8C. Se analizan las etapas que lo conformaban y se explica la reingeniería de cada una de estas etapas y su diseño con dispositivos electrónicos que realizan la función original.

Tabla 1. Clasificaciones de los UAV y sus principales ventajas y desventajas.

Configuración	Ventaja	Desventaja
Ala fija	Mecánica simple Operación silenciosa	No permanece inmóvil
Rotor único	Buen control y maniobrabilidad	Mecánica compleja Rotor grande Cola larga
Rotor axial	Compacto Mecánica simple	Control complejo Mala maniobrabilidad
Rotor coaxial	Compacto Mecánica simple	Aerodinámica compleja
Rotor tándem	Buen control y maniobrabilidad No hay interferencia aerodinámica	Mecánica compleja Gran tamaño
Cuadricoptero	Buena maniobrabilidad Mecánica simple Aumento en la carga útil	Consume mucha energía
Dirigible	Consume poca energía Auto sustentación	Gran tamaño a la maniobrabilidad
Híbrido	Buena maniobrabilidad Buena supervivencia	Gran tamaño Diseño complejo
Tipo pájaro	Buena maniobrabilidad Poco consumo energético	Mecánica compleja Control complejo
Tipo insecto	Buena maniobrabilidad Compacto	Mecánica compleja Control complejo
Tipo pez	Movilidad multimodal Aerodinámica eficiente	Control complejo Mala maniobrabilidad

2. Principio de operación

El cuadricoptero es una aeronave que se eleva y se desplaza por la acción de cuatro motores instalados al final de un marco en forma de cruz [1]. El control se logra variando la velocidad angular de cada uno de los cuatro motores. Utilizan la energía eléctrica de una batería, además de sistemas de control y sensores electrónicos para estabilizar al vehículo (se entiende como estable a la capacidad de la aeronave de permanecer en una misma posición en el aire sin la intervención del operador/piloto que la controla, el mayor tiempo posible). La principal ventaja que tiene un cuadricoptero sobre los helicópteros convencionales es que no necesitan de un sistema mecánico para variar el disco del rotor para desplazarse, si no que con sólo variar la velocidad angular de uno de sus rotores puede desplazarse.

El cuadricoptero más común es el del tipo "x" o "+". En esta estructura todos los brazos tienen la misma longitud y la electrónica se encuentra alojada en el centro de gravedad de la estructura.

La diferencia entre una estructura en "x" y otra "+" radica en lo que se establece como "adelante-atrás-derecha-izquierda" [2].

La opción "+" es la más fácil de comprender y programar ya que los movimientos de *pitch* (cabeceo) y *roll* (alabeo) se producen dejando una pareja de motores a revolución constante y modificando la otra pareja, de tal modo que uno de ellos incrementará su revoluciones mientras que el otro las bajará. La gran ventaja de permanecer inmóviles en el aire es a su vez su punto más débil, ya que el efecto que produce la rotación de sus hélices se debe compensar de alguna manera. De lo

contrario, el cuadricoptero conseguiría sustentarse pero el problema surge al intentar hacer girar todas las hélices en la misma dirección, ya que el torque total que produce el giro de todas ellas es suficiente para hacer girar el dispositivo de forma descontrolada. Para solucionar este problema se instalan hélices en sentidos de rotación opuestos de forma diametral, es decir, se alternan hélices de giro a derecha con hélices de giro a izquierdas resultando nula la suma de las fuerzas que generan.

Los movimientos de traslación y rotación de un cuadricóptero se controlan mediante variaciones en la velocidad de giro de sus rotores que definen las fuerzas de empuje vertical en cada uno de ellos. Así pues, para que el dispositivo ascienda/descienda se debe aumentar/disminuir la velocidad de rotación de todos los motores simultáneamente. Las traslaciones en las tres direcciones del espacio se producen generando un empuje diferencial entre dos rotores alternos [3]. Este juego de sumas y restas de fuerzas es el que permite también el movimiento controlado. Para logar el movimiento controlado se consideran tres ejes o grados de libertad:

- Guiñada (*yaw*): Se refiere al movimiento cuando el vehículo gira sobre su eje vertical. Este movimiento está definido por el ángulo de giro ψ.
- Inclinación o cabeceo (*pitch*): Es el movimiento que permite el movimiento hacia adelante y atrás. Este movimiento está definido por el ángulo de giro θ.
- Bamboleo o alabeo (*roll*): Es cuando el vehículo se mueve a la izquierda o derecha. Este movimiento está definido por el ángulo de giro ϕ.

La combinación de estos tres movimientos mostrada en la figura 1, es lo que permite maniobrar al cuadricoptero libremente [4-5].

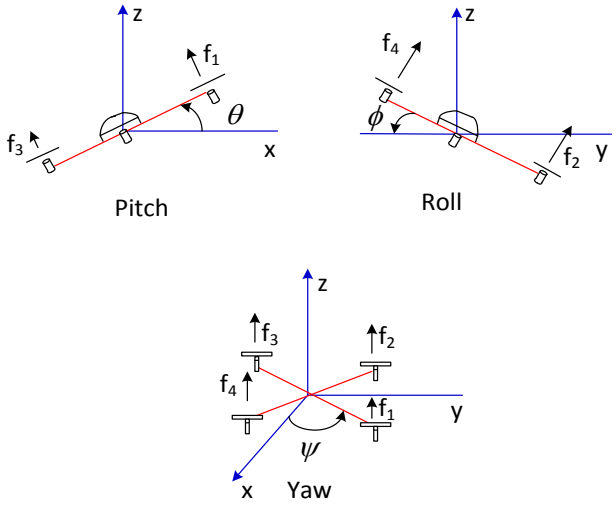


Figura 1. Movimientos del cuadricoptero.

Los cuatro motores son equidistantes tanto uno del otro como del centro mismo de la estructura, lo cual lo convierte en un vehículo simétrico, en el que cada uno de los motores produce empuje y torque, es por ello que para asegurar que el vehículo se eleve y pueda desplazarse en el aire es necesario que el sentido de giro de los motores y el tipo de hélice a utilizar sea el adecuado [6].

Para estudiar la reingeniería inversa del cuadricoptero se adquirió el modelo H8C dada su disponibilidad en el mercado. La carcasa del H8C ofrece beneficios por sus características como dimensiones, peso y otras especificaciones, que facilitan su estudio y realizar la reingeniería. En la figura 2 se muestra el prototipo. Una de las primeras tareas consistió en realizar pruebas de vuelo con el objetivo de evaluar la comunicación y el control del dispositivo. En la tabla 2 se resumen las principales especificaciones técnicas de este cuadricoptero.

Figura 2. Cuadricoptero modelo H8C 4 CH digital R/C.

Tabla 2. Especificaciones técnicas del Cuadricoptero modelo H8C.

Características	H8C
Peso	733 gramos
Tiempo de vuelo	8 minutos
Batería	7.4 V, 500 mAh
Motor	0820
Resistencia al viento	Fuerte
Modo	2 modos de vuelo

Se removió la carcasa del cuadricoptero y se analizó la tarjeta interna con el objetivo de identificar las etapas necesarias para su operación y control. Internamente la forma de la tarjeta de control, comunicación y los controladores de velocidad (ESC), están integrados en una tarjeta impresa de tamaño pequeño. En la figura 3 se muestra el interior del cuadricoptero H8C. De esta situación se deriva el primer problema, el peso del dron cambiará de manera significativa una vez que se realicen los cambios previstos.

Figura 3. Interior del cuadricoptero H8C.

En general se definieron los siguientes elementos como necesarios para el funcionamiento del cuadricoptero.

- Mando de control: dispositivo que se utiliza para controlar al Cuadricoptero a distancia. Usa la comunicación inalámbrica para comunicarse con el microcontrolador. Puede ser un dispositivo móvil, un control, una tablet, un control de radio frecuencia (RF) etc.
- Plataforma: interfaz gráfica con la que interactúa el usuario en caso de usar un mando electrónico con display (celular, tablet, laptop). Es el software con el que interactúa el usuario.

- Módulo de comunicación inalámbrica: dispositivo necesario para realizar el enlace inalámbrico entre la tarjeta de control y el mando por medio de RF.
- Microcontrolador: circuito integrado programable, el cual realiza todas las operaciones automáticas en los motores del cuadricoptero y recibe la información enviada por el usuario para ejecutar las acciones deseadas.
- Controladores de motores: circuitos externos al microcontrolador, necesario para controlar la velocidad de los motores utilizando PWM.
- Batería o sistema de alimentación: fuente de energía de todo el dispositivo.

A partir de los elementos mencionados anteriormente, se establecieron las etapas a ser rediseñadas para la operación del cuadricoptero y que se describen a continuación.

3. Modelo matemático

El modelo matemático del cuadricoptero viene dado por el conjunto de ecuaciones que describen el comportamiento físico de la aeronave. En este proyecto se han desarrollado dos modelos: el modelo no lineal y el modelo simplificado.

3.1 Modelo no lineal

Para modelar matemáticamente el cuadricoptero se considera como un cuerpo solido de masa *m* en un sistema de referencia I, sujeto a una fuerza total ***u*** y a tres momentos , $T\emptyset, T\,\theta, T\psi$ [5]. Las entradas del modelo son las tensiones aplicadas a los cuatro motores, y las salidas son las posiciones y velocidades en los seis grados de libertad del cuadricoptero. La dinámica de los motores del es relativamente rápida por lo que se desprecia la flexibilidad de las alas. Las coordenadas generales del modelo del cuadricóptero de manera general vienen dadas por:

$$q = (x, y, z, \emptyset, \theta, \psi) \in R^6 \tag{1}$$

donde $\xi = (x, y, z)$ denota la posición del centro de masa del cuadricóptero respecto a la Tierra y $\eta = (\phi, \theta, \varphi)$ son los ángulos de Euler e indican la orientación del cuadricóptero. Para la obtención del modelo se utiliza Euler-LaGrange, que es un método en el que se relaciona la energía cinética de un cuerpo con su energía potencial. Así se tiene que la energía cinética de traslación del cuerpo viene dado por la ecuación (2).

$$E_{CT} = \frac{1}{2}\, m\dot{\xi}\dot{\xi} \tag{2}$$

donde se tiene que “m” es la masa del cuadricóptero y $\dot{\xi}$ es la velocidad lineal en cada uno de los ejes, la energía cinética de rotación viene dada por:

$$E_{CR} = \frac{1}{2}\, \dot{\eta}\boldsymbol{J}\dot{\eta} \tag{3}$$

La matriz ***J*** es la matriz de inercias del cuadricóptero y $\dot{\eta}$ es la velocidad angular en cada uno de los ejes. La energía potencial del cuadricóptero viene dada por:

$$E_p = mgz \tag{4}$$

donde z es la altura a la que se encuentra el cuadricóptero en el espacio. Con las energías que se tiene se puede calcular el Lagrangiano como:

$$L(q, \dot{q}) = E_{CT} + E_{CR} + E_p \tag{5}$$

$$L(q,\dot{q}) = \frac{1}{2}\, m\dot{\xi}^T\xi + \frac{\dot{1}}{2}\, \dot{\eta}\boldsymbol{J}\dot{\eta} - mgz \tag{6}$$

El modelo dinámico del cuadricóptero es obtenido por el método de Euler-LaGrange con la fuerza externa generalizada, así se tiene que:

$$\frac{d}{dt}\frac{\delta L}{\delta \dot{q}} - \frac{dL}{dq} = F \tag{7}$$

Se conoce que $F = F_\xi \tau$, donde F_ξ es la fuerza de traslación y τ son los momentos generalizados aplicados al cuadricóptero por la entrada de control. La fuerza depende principalmente de las entradas de control $\mu\ y\ \tau$, por lo que se puede escribir de la siguiente manera:

$$\hat{F} = \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ \mu \end{matrix} \tag{8}$$

donde se tiene que μ es la fuerza de sustentación y viene dada por:

$$\mu = f1 + f2 + f3 + f4 \tag{9}$$

Y se tiene que:

$$f_i = k_i\omega_i \; i = 1,2,3,4 \tag{10}$$

donde se tiene que $k_i > 0\ y\ \omega_i$ es la velocidad angular a la que gira el motor de las hélices. La fuerza de traslación es calculada de la siguiente manera:

$$F_\xi = R_{abc}^{NED^T}\hat{F} \tag{11}$$

donde $R_{abc}^{NED^T}$ es la matriz de rotación y $\hat{F}$ está definida en la ecuación (8). Las matrices de rotación de cada uno de los ejes vienen dadas por:

$$Rz,\psi = \begin{bmatrix} cos\psi & -sin\psi & 0 \\ sin\psi & cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$Ry,\theta = \begin{bmatrix} cos\theta & 0 & sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -sin\theta & 0 & cos\theta \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$Rx,\phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & cos\theta & -sin\theta \\ 0 & sin\theta & cos\theta \end{bmatrix} \tag{14}$$

$$R_{abc}^{NED} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi s\theta c\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\phi + s\psi s\theta c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\phi c\theta \end{bmatrix} \tag{15}$$

donde:

$$c\psi = cos\psi, c\theta = cos\theta, c\phi = cos\phi$$
$$s\psi = sin\psi, s\theta = sin\theta, s\phi = sin\phi$$

reemplazando en la ecuación 11:

$$F_{\xi} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi s\theta c\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\phi + s\psi s\theta c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\phi c\theta \end{bmatrix}^{T} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \mu \end{bmatrix} \quad (16)$$

desarrollando la ecuación 16 se obtiene :

$$F_{\xi} = \mu \begin{bmatrix} -s\theta \\ c\theta s\phi \\ c\phi c\theta \end{bmatrix} \quad (17)$$

Los momentos generalizados viene dados por la ecuación 18.

$$\tau \stackrel{\Delta}{=} \begin{bmatrix} \tau\psi \\ \tau\theta \\ \tau\phi \end{bmatrix} \quad (18)$$

La letra τ representa a los tres momentos que el cuadricóptero presenta en los tres ejes. Está referido a los ángulos de yaw, pitch y roll. Para el momento de guiñada (yaw) se tiene:

$$\tau\psi = \tau 1 + \tau 2 + \tau 3 + \tau 4 \quad (19)$$

Para el momento de cabeceo se tiene:

$$\tau\theta = \Delta f_{2,4} \cdot l \quad (20)$$

donde $\Delta f_{2,4}$ es la diferencia de fuerza de sustentación que habrá entre los motores 2 y 4, que se encuentran ubicados uno en frente de otro, multiplicada por la distancia desde el motor 2 o 4 hasta el centro de gravedad.

Para el momento de alabeo (roll) se tiene:

$$\tau_{\phi} = \Delta f_{1,3} \cdot l \quad (21)$$

donde $\Delta f_{1,3}$ es la diferencia de fuerza de sustentación que habrá entre los motores 1 y 3, que se encuentra ubicados uno en frente de otro, multiplicada por la distancia desde el motor 1 o 3 hasta el centro de gravedad. Uniendo los momentos en una sola matriz se tiene que:

$$\tau = \begin{matrix} \psi \\ \theta \\ \phi \end{matrix} = \begin{matrix} \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 \\ \Delta f_{2,4} \cdot l \\ \Delta f_{1,3} \cdot l \end{matrix} + \begin{matrix} \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 \\ (F2 - F4)] \\ (F1 - F3)] \end{matrix} = \begin{matrix} \ddot{\psi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \end{matrix} \quad (22)$$

Como las ecuaciones de Lagrangiano no contienen términos cruzados en la energía cinética, se puede combinar $\dot{\xi}$ y $\dot{\eta}$; la ecuación de Euler-LaGrange puede ser dividida en dinámica para ξ y dinámica para η, de esta manera se tiene que:

$$m\ddot{\xi} - \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{matrix} = F_{\xi} \quad (23)$$

Reemplazando la ecuación 17 en la ecuación 23 y separando en cada uno de los ejes se obtiene:

$$m\ddot{x} = -u\ sin\theta \quad (24)$$

$$m\ddot{y} = u\,cos\theta\,sin\phi \quad (25)$$
$$m\ddot{z} = u\,cos\theta\,cos\phi - mg \quad (26)$$

Con lo cual con las ecuaciones 22, 24, 25 y 26, queda definido el modelo del cuadricóptero.

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -u\,sin\theta \\ m\ddot{y} &= u\,cos\theta\,sin\phi \\ m\ddot{z} &= u\,cos\theta\,cos\phi - mg \\ \tau_{\psi} &= \ddot{\psi} \\ \tau_{\theta} &= \ddot{\theta} \\ \tau_{\phi} &= \ddot{\phi} \end{aligned} \quad (27)$$

donde $u, \tau_{\psi}, \tau_{\theta}\ y\ \tau_{\phi}$ representan las entradas de control.

3.2 Modelo simplificado

El modelo simplificado considera únicamente los parámetros relativos a la orientación del cuadricoptero. Es decir, se requiere de un conjunto de parámetros tales como: dimensiones, masa, momentos de inercia y características dinámicas de los sistemas propulsores para el control del cuadricoptero.

En este proyecto se utiliza el modelo simplificado para el control del cuadricoptero, los parámetros mecánicos se obtienen de las hojas de especificación de fábrica del prototipo seleccionado. Por otro lado, para la estimación de los parámetros dinámicos de los motores se utiliza el método estocástico.

Las variables medidas durante los ensayos son el voltaje, la corriente, la velocidad de los motores, la fuerza de empuje y el par de arrastre. A partir de estas medidas, se han deducido los valores de los parámetros dinámicos de los motores.

No obstante cabe remarcar que en el modelo simplificado no se consideraron los efectos aerodinámicos.

4. Mando de control

Como mando de fábrica el cuadricoptero tenía un control de RF, el cual se comunicaba por medio de *bluetooth*®. Este mando, fue sustituido por un dispositivo móvil, en este caso un celular con sistema operativo *android*®, esto, para hacer más versátil la capacidad de controlar el cuadricoptero, ya que el usuario puede utilizar su propio celular o cualquier dispositivo que corra con el sistema operativo *android*® como mando inalámbrico.

5. Plataforma

Para que el usuario interactúe con el cuadricoptero y controle los movimientos del mismo es necesario contar con una interfaz que haga la función de los botones de un mando físico, para ello se diseñó una plataforma basada en *android*® a través de la aplicación *MIT APP INVENTOR 2,* creada por *Google Labs.* Dicha aplicación utiliza la programación por bloques y se basa en bloques de funciones predeterminadas para tener una interfaz más amigable con el usuario. Además, está diseñada para trabajar con enlace *bluetooth*®.

En la figura 4 se muestra el software *MIT APP INVENTOR 2* junto con la plataforma creada para los dispositivos *android*®.

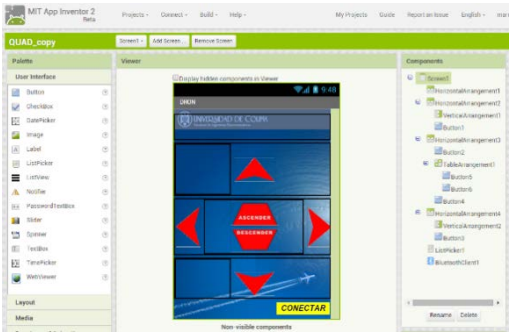


Figura 4. MIT APP INVENTOR, pestaña de diseño.

6. Módulo de comunicación inalámbrica

Para realizar una conexión remota entre el dispositivo de mando y el microprocesador, se utilizó la tecnología *bluetooth*®, que contiene un índice nominal de 10 metros con índices de datos de hasta 1 Mbps. En la tabla 3 se muestran las principales características de la tecnología de comunicación *bluetooth*®.

El módulo implementado es el modelo HC-05 compatible con *arduino*®. En la figura 5 se muestra la forma de conexión entre el *arduino*® y el módulo de comunicación *bluetooth*® HC-05.

Tabla 3. Características generales del Bluetooth®.

Modulación	GFSK
Ancho de banda	220 kHz – 1 MHz
Banda de RF	2.4 GHz – 2.4835 GHz
Canales	Hasta 79
Alcance	Hasta 10 metros

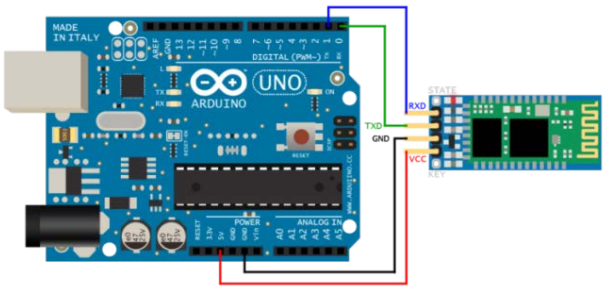


Figura 5. Conexión arduino® HC-05.

7. Microcontrolador

Para sustituir el microcontrolador original del cuadricoptero, se utiliza el hardware libre *arduino*®.

Arduino® es una plataforma de prototipos de electrónica de código abierto (open-source) basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar. Puede “sentir” el entorno mediante la recepción de

entradas desde una variedad de sensores y puede afectar a su alrededor mediante el control de luces motores, actuadores u otros artefactos. El microcontrolador de la placa se programa usando el “Arduino Programming Language” (basado en Wiring) y el “Arduino Development Enviroment” (basado en Processing) [7].

Inicialmente el seleccionado para la tarea de micontrolador en el UAV fue *arduino*® UNO. No obstante para disminuir el peso del prototipo se sustituyó por el *arduino*® MINI Pro; el cual es totalmente compatible en cuestiones técnicas, puesto que comparte su microprocesador; únicamente difiere en el tamaño y peso, ideal para proyectos donde estas características son de gran importancia, como es el caso.

8. Controladores de motores

Para controlar las revoluciones por minuto de cada motor (rpm), se pensó en adquirir módulos controladores de motores, pero se optó por utilizar un arreglo de transistores que es básicamente un transistor activado por una técnica de modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés *Pulse-Width Modulation*) como se muestra en la figura 6. Los pulsos PWM se generan utilizando *arduino*®. El diodo conectado en antiparalelo con el motor se conoce como diodo de libre circulación (*freewhiling*) y se utiliza para evitar posibles flujos de corrientes inversas debido al paro de los motores (dado que una carga inductiva se opone a los cambios bruscos de corriente).

El circuito mostrado en la figura 6 básicamente actúa como un controlador de velocidad electrónico (ESC, por sus siglas en inglés *Electronic Speed Controller*), este circuito se utilizó para controlar la velocidad en cada uno de los motores del cuadricoptero de manera independiente.

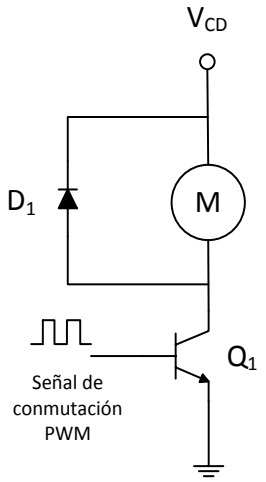


Figura 6. Diagrama electrónico para el control de los motores.

9. Fuente de alimentación

Una de las principales problemáticas que se encontró en el proceso de reingeniería fue el gran consumo de energía necesario para alimentar a toda la circuitería del prototipo. Por esta razón, se utilizó una batería de litio de 7.4 V y 500 mA/h, la cual tiene como característica principal la capacidad de suministrar gran cantidad de potencia en poco tiempo, sin embargo, a causa de la demanda de potencia, sólo se alcanza una duración de 6 a 8 minutos de vuelo constante.

10. Resultados experimentales

10.1. Lazo abierto

El contenido interno original del cuadricoptero fue sustituido por los dispositivos nuevos, procurando mantener el peso inicial y conservar el centro de gravedad.

Como primer caso de estudio se realizaron pruebas de vuelo en lazo abierto, todo de manera manual utilizando el dispositivo móvil como control de los motores. No obstante, no fue posible estabilizar los motores, ya que ante cualquier ligera perturbación el cuadricoptero se inclinaba en diferentes direcciones. Por lo que se decidió integrar una unidad de medición inercial o IMU (del inglés *Inertial Measurement Unit*) para compensar el giro de los motores y estabilizar el cuadricoptero. Se realizaron distintas pruebas, antes de proponer el IMU, variando manualmente la velocidad de cada uno de los motores, cambiando el ambiente de trabajo, compensando las diferencias de peso, cambiando el centro de gravedad, etc. Sin embargo se llegó a la conclusión de que resultada imposible mantener la estabilidad sin el uso de un sensor de posición que realizara una debida retroalimentación a la etapa de control, es decir, que era necesario un lazo cerrado.

10.2. Unidad de medición inercial

En un UAV, la habilidad y los sentidos del aeronauta han sido sustituidos por sensores electrónicos de gran precisión, que consiguen una maniobrabilidad prácticamente perfecta, como son los acelerómetros o los giroscopios [9].

Una IMU es un dispositivo que mide e informa acerca de la posición y los cambios de aceleración e inclinación en un dispositivo usando una combinación de acelerómetros y giroscopios [9].

La aceleración puede expresarse en tres dimensiones *x*, *y* y *z*. La gravedad de la tierra tiene una aceleración de 9.8 m/s^2, perpendicular al suelo. Así pues, el IMU detecta la aceleración de la gravedad terrestre que afecta directamente al eje Z. De esta forma, gracias a la gravedad terrestre se pueden utilizar las lecturas del acelerómetro para saber cuál es el ángulo de inclinación respecto al eje *x* ó *y*, tal que:

$$AnguloY = atan\left(\frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) \tag{28}$$

$$AnguloX = atan\left(\frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) \tag{29}$$

Por otro lado, el giroscopio mide la velocidad angular (número de revoluciones que se gira en un segundo). Por lo que, si se conoce el ángulo inicial de la IMU es posible sumarlo al valor que marca el giroscopio para saber el nuero ángulo en cada instante. Suponiendo que se inicia la IMU en 0° y el giroscopio realiza una medida cada segundo, y marca 3 en el eje X, entonces se tiene que:

$$AnguloY = AnguloYanterior + x\Delta t \tag{30}$$

donde Δt es el tiempo que transcurre cada vez que se realiza la medición.

Las medidas proporcionadas por el IMU se pueden utilizar por los algoritmos de control para determinar la posición de un objeto respecto a la tierra. En este trabajo se utilizó el IMU MPU-6050 mostrado en la figura 7. El MPU-6050, es de 6DOF (seis grados de libertad), esto significa que lleva un acelerómetro y un giroscopio, ambos de 3 ejes y opera con 3.3 V.

Figura 7. IMU MPU-6050.

10.3. Lazo cerrado

Se implementó el IMU a la circuitería y se realizaron los cambios necesarios en algoritmo de programación. En la figura 8 se muestra la circuitería implementada en el interior del cuadricoptero, la cual es considerablemente más grande que la original mostrada en la figura 3.

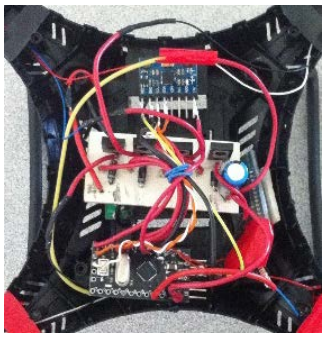


Figura 8. Interior del cuadricoptero con la circuitería implementada en la reingeniería inversa de la tarjeta de control.

Una vez implementadas todas las etapas en el cuadricoptero se realizaron diferentes pruebas de vuelo, no obstante se observaban algunas desviaciones cuando se intentaba estabilizar al cuadricoptero, es decir, que pequeñas perturbaciones debidas al viento provocaban desbalances en el cuadricoptero. Para resolver este problema se utilizó un filtro, el cual tiene como objetivo conseguir que el acelerómetro no cambie de ángulo al detectar otra fuerza que no sea la gravedad. El tipo de filtro que se utilizó es un filtro complementario, que es en realidad la unión de dos filtros diferentes: un filtro paso alto para el giroscopio y otro paso bajo para el acelerómetro.

De esta forma, con el IMU y el filtro se integró el circuito completo para el control del cuadricoptero. El IMU permitió entregar ángulos positivos y/o negativos al sistema en *x* y en *y*, con estos valores los motores variaron sus rpm, permitiendo mejorar la autonomía del cuadricoptero al decidir cuál motor se debía variar para conseguir el ángulo inercial deseado.

Se realizaron varias pruebas de vuelo y el objetivo original que era controlar al cuadricoptero se alcanzó satisfactoriamente.

11. Análisis de resultados

Las etapas implementadas en el proyecto por medio de la ingeniería inversa fueron las correctas. Se logró el objetivo principal, el cual era reinventar el funcionamiento de un cuadricoptero basándose en un análisis del diseño y etapas originales, sin embargo, no se alcanzaron las especificaciones deseadas tales como un tiempo de vuelo relativamente grande o una estabilidad estricta ya que el tiempo de realización del proyecto limito mucho el avance en cuanto detalles finales y pulimiento de especificaciones.

La implementación del microcontrolador *arduino*® y el enlace por *bluetooth*® con un dispositivo móvil para controlar el cuadricoptero se considera positivo, ya que se logró controlar hasta con un radio de 12m en línea de vista al cuadricoptero.

No obstante, una desventaja del prototipo final fue el peso, ya que al sustituir la tarjeta original del cuadricoptero que contenía componentes electrónicos de montaje superficial por varias tarjetas de montaje convencional el peso del prototipo final se incrementó considerablemente, lo que origino que el desempeño del cuadricoptero tales como la duración del tiempo de vuelo bajara considerablemente. Como trabajo futuro de este proyecto se implementará la circuitería con elementos de montaje superficial o SMT (del inglés *Surface Mount Technology*).

12. Conclusiones

La construcción de un cuadricoptero requiere un amplio conocimiento aerodinámico y sobre todo de sistemas de control y programación. Uno de los retos más importantes de este proyecto fue el de trabajar con una estructura mecánica fija, prediseñada como lo es la carcasa del cuadricoptero, ya que se requirió de un trabajo minucioso para trabajar en el espacio reducido y sobretodo tratar de igualar el peso original del prototipo bajo estudio.

Por otro lado, en relación al control se llegó a la conclusión de no era posible alcanzar la estabilidad necesaria para realizar el vuelo sin un lazo de control.

Referencias

[1] Austin, R., Unmanned Air Systems: *UAV Design, Development and Deployment, Wiley, Hoboken*, NJ, USA, 2010.
[2] Rafael, E., *Diseño, construccion, instrumentación y control de un vehículo aéreo no tripulado (UAV)*, Instituto politécnico nacional , México, D.F., 2010.
[3] Sevilla, L. F., *Modelado y control de un cuadricoptero*, Madrid, España, 2014.
[4] Bai, H., Shao, S. and Wang, H., *A vtol quadrotor platform for multiuav path planning, in Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology* (EMEIT), 2011 International Conference on, IEEE, pp. 3079–3081, Heilongjiang, China, August 2011.
[5] Imperato, A., Manjarres, P., “Diseño de un control PID digital para la regulación de vuelo estacionario de un mini helicóptero UAV,”. Tesis de licenciatura. Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería, 2011.
[6] Barrón, L. A. H., *Diseño y desarrollo de un vehiculo volador de cuatro helices no tripulado de bajo costo*, La mecatronica en Mexico, vol. 3, No. 1, pp. 23-36, 2014.
[7] Herrador, R. E., *Guia de usuario de arduino*, Córdoba, España, 2009.
[8] Ramos, V. V., Esteve, B. R., *Diseño e implementación de un quadcopter basdo en microcontrolador arduino*, Memoria de tesis, Universidad Politecnica de Valencia, 2013.
[9] Minor, R. R., Rowe, D. W., *Utilization of GPS/MEMSIMU for measurement of dynamics for range testing of missiles and rockets*, Position Location and Navigation Symposium, IEEE 1998, pp. 602-607, 20-23, Apr. 1998.

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

22. Robot de dos grados de libertad aplicado a la rehabilitación del brazo

Castañeda Villafaña Joanna Iridiana, Charre Ibarra Saida Miriam, Jorge Gudiño Lau, Martínez Olmedo Lamberto Gastón, Sánchez Díaz José Francisco

scharre@ucol.mx;

Universidad de Colima
Facultad de Ingeniería Electromecánica
Manzanillo, Colima, C.P. 28860

Resumen

El presente trabajo muestra el diseño, elaboración y control de un robot de tipo efector final aplicado a la rehabilitación del brazo. El diseño está basado en consideraciones anatómicas y terapéuticas. También se muestra la instrumentación del prototipo, siendo ésta a través de sensores de posición que permiten la obtención de datos angulares que son procesados y a su vez enviados al computador para su respectivo análisis.

Palabras clave: Robot, Rehabilitación, Adquisición de Datos, Control PID.

1. Introducción

El número de personas sufriendo algún tipo de discapacidad física se ha estimado, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización de Rehabilitación Internacional (RI) y la Oficina Panamericana de la Salud (OPS), entre el 7 y 10% de la población mundial total. Ahora bien, hablando específicamente de México, la OMS ha calculado una población con discapacidad del 14%, es decir, aproximadamente 16.5 millones de mexicanos padecen alguna discapacidad física. De esta cifra el 5.5% corresponde a la población con discapacidad en extremidades superiores [1].

La discapacidad en las extremidades superiores se debe principalmente a enfermedades y accidentes. Este tipo de discapacidad obstaculiza que la persona pueda realizar actividades para atenderse a sí mismo, como lo son vestirse, asearse y comer; al igual que incorporarse al mundo laboral, educativo, inclusive al social. Estas limitaciones pueden ser tratadas mediante la terapia de rehabilitación puesto que mantiene y mejora la funcionabilidad de la extremidad y tiene como fin conseguir una óptima realización de las actividades anteriormente mencionadas.

El primer trabajo en robótica de rehabilitación y terapias de asistencia inició en los años sesentas y desde entonces han aparecido una amplia variedad de sistemas de dos tipos: efector final y exoesqueleto [2] [3] [4] [5]. Uno de los sistemas que destacaron fue el MIT-MANUS, mostrado en la Figura 1, que se utilizó para demostrar los beneficios de la interacción con el dispositivo durante las etapas iniciales de la recuperación del paciente. Este dispositivo es un manipulador robótico planar construido mediante un mecanismo SCARA (*Selectiva Brazo Robot de Montaje Compatible)* que permite dos grados de libertad traslacionales y que fue diseñado para rehabilitación de pacientes con apoplejía [6]. Puede mover u oponerse a los movimientos de hombro y codo del paciente. Utiliza

diferentes sensores para medir la posición, velocidad y fuerzas ejercidas sobre el efector final. Esta información es enviada a un computador donde se actualiza una interfaz gráfica de usuario.

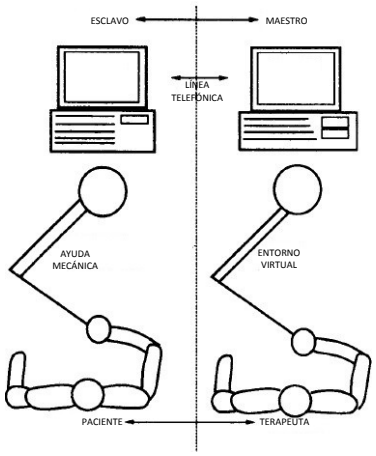


Figura 17. Diseño del MIT-MANUS.

De igual forma, el robot MIME (Figura 2), fue creado para rehabilitación de extremidades superiores [7]. Este dispositivo fue diseñado utilizando un robot PUMA-260 para el brazo hemipléjico y un soporte 3D para el brazo no afectado. Este dispositivo permite al paciente trabajar en un espacio 3D, de forma que el robot PUMA es capaz de sujetar el brazo durante movimientos 3D. El robot está conectado a un sensor de fuerzas para monitorizar la fuerza del paciente. MIME utiliza tres modos unilaterales y uno bilateral de funcionamiento. En el modo bilateral, el brazo no afectado controla el movimiento del robot. Los modos unilaterales, utilizan solo el robot PUMA, y son los modos pasivo, activo-asistido, activo-resistencia, y auto-guiado.

Figura 18. Robot MIME.

Los diseños mecánicos de los sistemas anteriores se basaron en consideraciones anatómicas en cuanto al miembro superior. En la Figura 3 se observan los ángulos de rotación del brazo [8].

Tomando como base la información anterior, es como se diseñó el robot de dos grados de libertad de tipo efector final, que ayuda a cualquier paciente con problemas de movimiento o alguna discapacidad en el brazo. El reto es que la persona pueda ser guiada por el robot generándole movimientos continuos y repetitivos, ya que estos ayudan a que el brazo se mueva con más fluidez. Es un brazo de dos grados de libertad que es capaz de desplazarse sobre el plano XY. Cuenta con dos motorreductores de encoder magnético acoplados a los ejes, los cuales indican su posición angular. Es manipulado desde un computador haciendo lecturas de los movimientos guiados para que éste los reproduzca de forma repetitiva.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

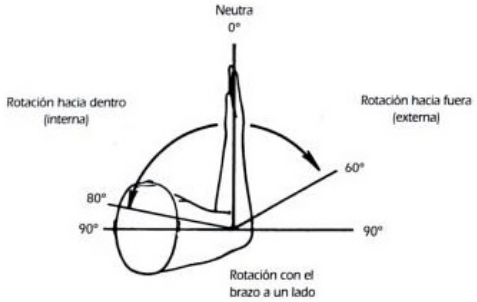


Figura 19. Ángulo de rotación del brazo.

2. Desarrollo

2.1 Funcionamiento

El proceso inicia en la PC, la cual mediante la tarjeta de adquisición PCI NI 6221, enviará la señal a los actuadores (motores) para que estos hagan el movimiento del brazo hasta el ángulo deseado. Después, el usuario manifiesta el movimiento en su brazo y ese mismo movimiento es registrado por el encoder, el cual retroalimenta la información hacia la tarjeta PCI y de nuevo hacia la PC para su monitoreo, como se muestra en la Figura 4. Además, debido a los puentes H fue necesario tener una salida de dirección para que los motores dieran el giro hacia la dirección correspondiente (avance o retroceso).

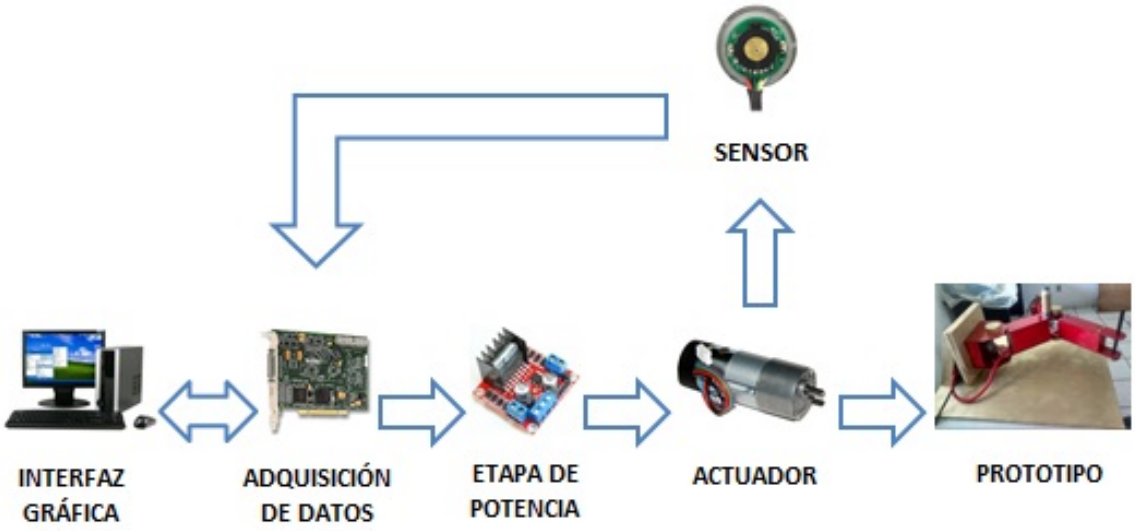


Figura 20. Diagrama del funcionamiento del sistema.

2.2 Diseño

El diseño, mostrado en la Figura 5, consta de cuatro eslabones, dos pares en paralelo, una base que sujeta a los eslabones, seis porta baleros, dos engranes, dos piñones y una manivela.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

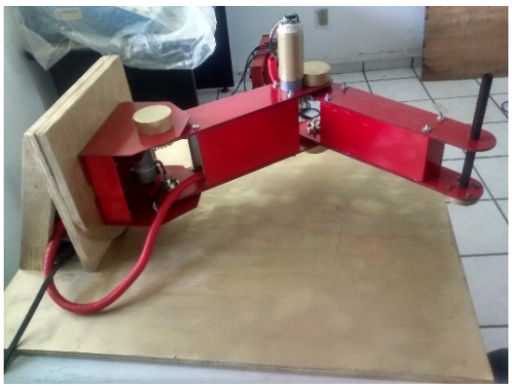


Figura 21. Robot para rehabilitación.

2.3 Manufactura

El material utilizado para la construcción del prototipo fueron el aluminio y el alucobond (paneles formados de aluminio y plástico), ya que ambos son materiales ligeros y de bajo costo.

2.3.1 Portabaleros

Como se aprecia en la Figura 6, se tornearon 6 portabaleros para los 3 ejes que maneja el brazo robot (Figura 5).

Figura 22. Maquinado de portabaleros en torno.

Los porta-baleros, mostrados en la Figura 7, se ajustaron a cada uno de los eslabones del robot.

Figura 23. Portabaleros.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

2.3.2 Eslabones

Se cortaron cuatro láminas de alucobond (eslabones) en la Fresadora CNC. En dichos eslabones, véase Figura 8, es donde se montaron los mecanismos que le darán el desplazamiento al robot en el plano XY. Tienen medidas similares a las del brazo de una persona; se hizo de esta manera para analizar mejor el espacio de trabajo del mismo.

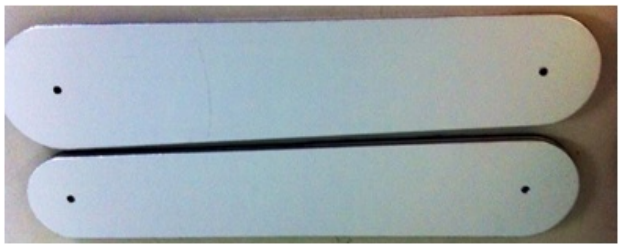


Figura 24. Eslabones.

2.3.3 Engranes y piñones

Se maquinaron dos barras dentadas en la fresadora convencional, una de 26 dientes y la otra de 13. Ambas se utilizaron para formar los engranes y piñones. Esto se muestra en la Figura 9.

Figura 25. Maquinado de engranes en fresadora convencional.

Se cortaron las barras para obtener los engranes (Figura 10) y piñones (Figura 11) necesarios.

Figura 26. Engranes.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Figura 27. Piñones.

2.4 Modelo Matemático

El modelo matemático de un robot de dos grados de libertad es el siguiente:

$$H(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \ (1)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{5}{3}ml^2 + ml^2c2 & \frac{1}{3}ml^2 + \frac{1}{2}ml^2c2 \\ \frac{1}{3}ml^2 + \frac{1}{2}ml^2c2 & \frac{1}{3}ml^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}ml^2s2\dot{q}_2 & -\frac{1}{2}ml^2s2(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ \frac{1}{2}ml^2s2\dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{3}{2}mglc1 + \frac{1}{2}mglc12 \\ \frac{1}{2}mglc12 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

Donde
$H(q)$= Matriz de nxn, que describe la inercia del robot y es definida positiva.
$C(q,\dot{q})$= Matriz de Coriolis y fuerzas centrífugas de dimensiones nxn.
$g(q)$= Vector de fuerza de gravedad de nx1.
τ= Vector de torque de los motores, de nx1.
q= Vector de nx1 que describe la posición angular.
$\dot{q}$= Vector de nx1 que describe la velocidad angular.
$\ddot{q}$= Vector de nx1 que describe la aceleración angular.

2.5 Adquisición de Datos

El proceso de adquisición de datos se llevó a cabo mediante una tarjeta PCI NI 6221 (Figura 12) y un computador. La PCI 6221 de National Instruments es una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) multifunción de bajo costo de la Serie M optimizada para aplicaciones condicionadas por costos. Cuenta con 16 entradas analógicas, 2 salidas analógicas y 24 entradas y salidas digitales. Su rango de frecuencia de operación máximo es de 1 MHz [9].

2.6 Interfaz Gráfica

Se realizó una interfaz gráfica amigable y sencilla la cual se muestra en la Figura 13. La interfaz consiste en controles en los cuales el terapeuta debe modificar los valores de tiempo, número de repeticiones del ejercicio y las constantes de fuerza (proporcional), exactitud (integral) y rapidez

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

(derivativa), conforme lo requiera el paciente; así como un apartado en el cual se mostrará la gráfica del proceso de avance del paciente.

Figura 28. Tarjeta de Adquisición de datos PCI NI 6221.

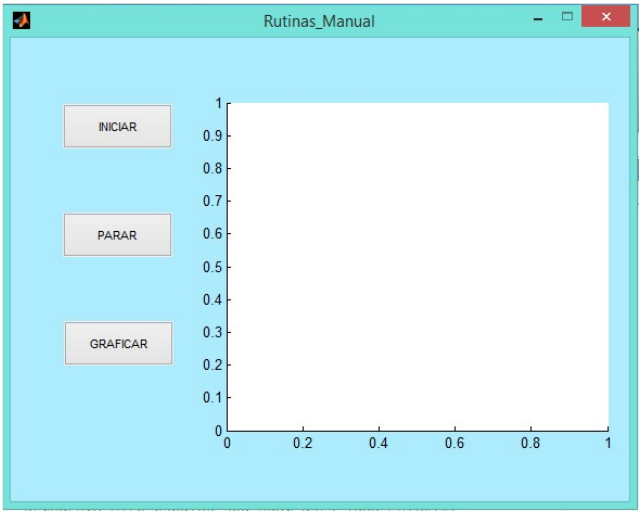


Figura 29. Interfaz Gráfica.

2.7 Control

El control se programó en la plataforma SIMULINK® del software MATLAB®, con la librería Real Time Windows Target y se muestra en la Figura 14.

*2.8*Sistema de rehabilitación para el miembro superior

En la figura 15 se presenta el sistema de rehabilitación completo con la conexión a la computadora para el monitoreo y control.

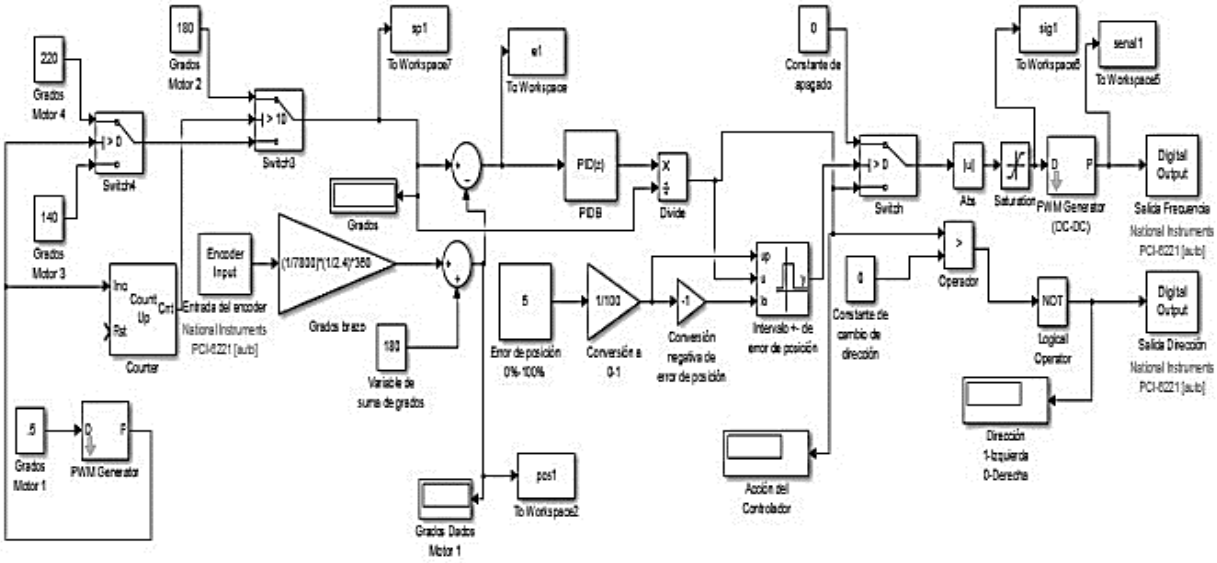


Figura 30. Diagrama de bloques del controlador PID en SIMULINK®.

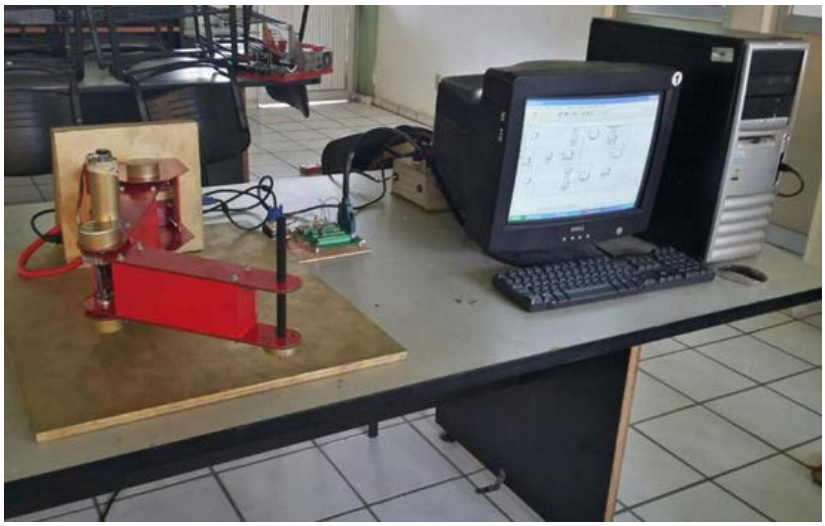


Figura 31. Sistema de rehabilitación.

3. Resultados

Los resultados en cuanto a la posición del motor 1 se observan en la Figura 16. El tiempo que tardo en posicionarse en el Set Point fue de 0.2 s.

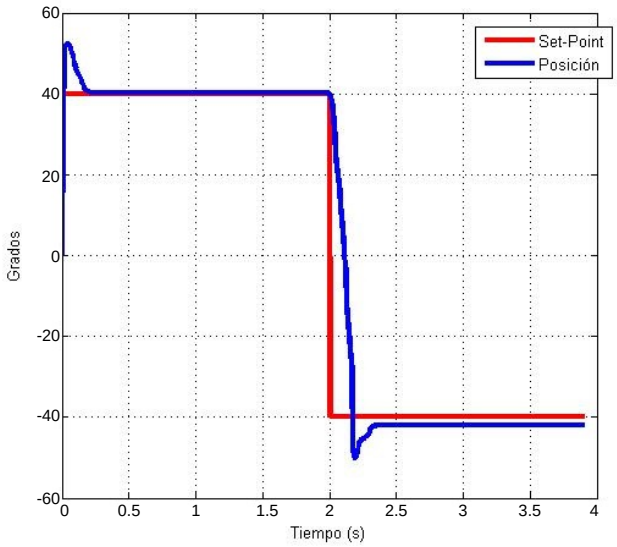


Figura 32. Posición del motor 1.

En la Figura 17 se muestra la señal de error que tuvo el motor 1.

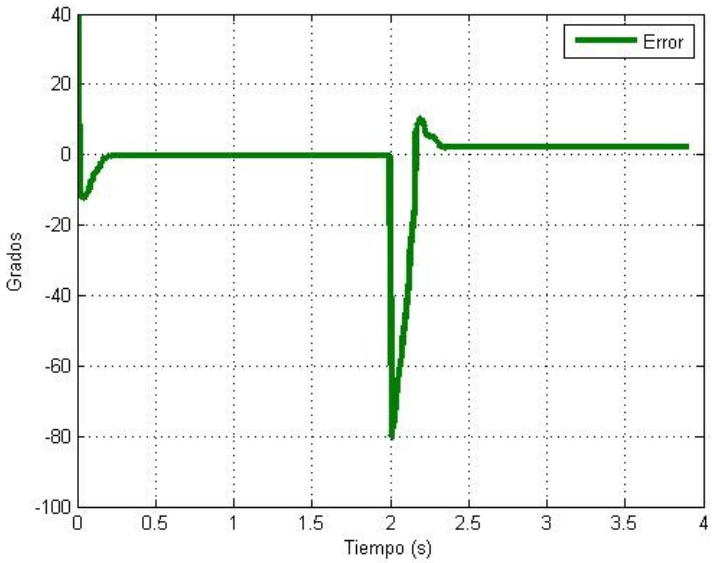


Figura 33. Error del motor 1.

En la Figura 18 se presenta la señal de control aplicada al actuador para lograr la posición deseada.

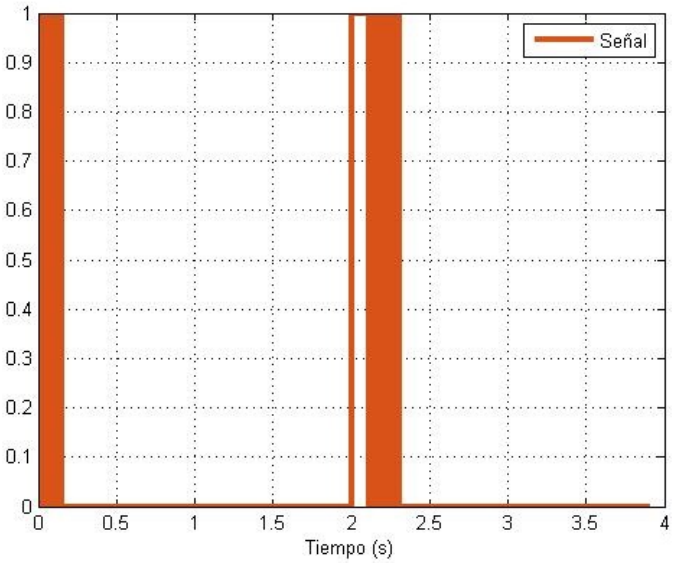


Figura 34. Señal del controlador del motor 1.

Los resultados del motor 2 se observan en la Figura 19. El tiempo que tardo en posicionarse en el Set Point fue de 0.1 s.

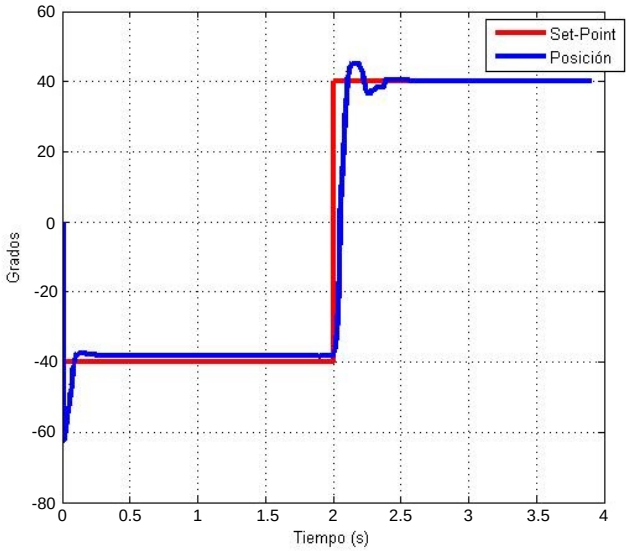


Figura 35. Posición del motor 2.

En la Figura 20 se muestra la señal de error que tuvo el motor 2.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

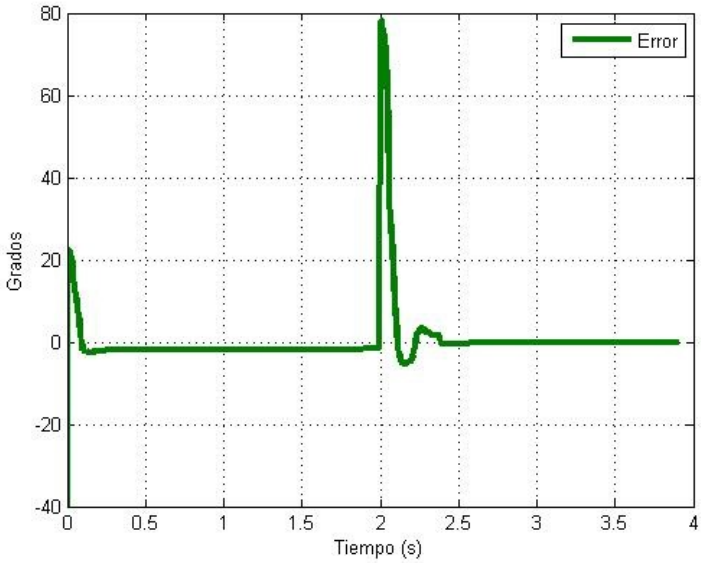


Figura 36. Error del motor 2.

En la Figura 21 se presenta la señal de control aplicada al actuador para lograr la posición deseada.

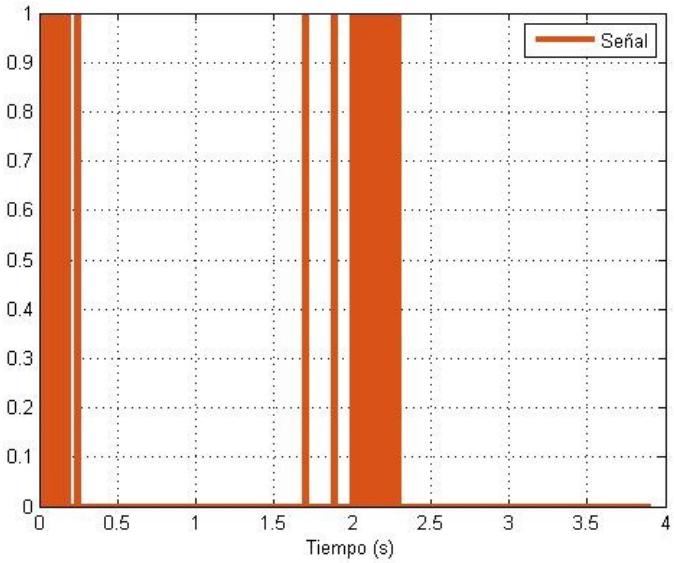


Figura 37. Señal del controlador del motor 2.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

4. Conclusiones

La aplicación de la tecnología y el desarrollo creciente de proyectos desarrollados por ingenieros para la rehabilitación de partes del cuerpo, provoca que esta última este en constante evolución y que los terapeutas utilicen como herramientas a robots como el mostrado en el presente trabajo.

El sistema está diseñado en arquitectura abierta, lo que significa que cada una de sus partes puede ser sustituida por sus equivalentes respetando las condicionantes de tipos y niveles de señales.

Como lo muestran los resultados el prototipo realiza las tareas repetitivas necesarias en las terapias para la rehabilitación del brazo.

Referencias

[1] "*Las personas con discapacidad en México: una visión al 2010"*. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*, México, 2013.

[2] Sabater, J.M., Azorín J.M., Pérez, C., García, N. "*Ayuda robótica para la rehabilitación de miembros superiores*", *2do Congreso Internacional sobre Domótica, Robótica y Teleasistencia para Todos".* DRT4all 2007. 19 – 28.

[3] Lugo H. "*Diseño robótico de un exoesqueleto pediátrico de miembro superior"*. México, 2013.

[4] Toth, A. "*Passive Robotic Movement Therapy of the Spastic Hemiparetic Arm with REHAROB: Report of the First Clinical Test and the Follow-up System Improvement*", 127 - 130. Chicago, IL, USA, 2005.

[5] Noritsugu, T. *"Application of rubber artificial muscle manipulator as a rehabilitation robot"*. IEEE/ASME Transactions On Mechatronics", 259 – 267, 1997.

[6] Hogan N., H. K. "*MIT-MANUS: a workstation for manual therapy and training.* I. IEEE Workshop on Robot and Human Communication, 161 – 165, 1992.

[7] Burgar, C.G., Lum, P.S., Shor, P.C., Van der Loos, H.F.M. "Development of robots for rehabilitation therapy: The Palo Alto VA/Stanford experience". 2001.

[8] Milner M., Gowitzke B. "*El Cuerpo y sus movimientos bases científicas"*, Ed. Paidotribo, España, edición 1, 1999.

[9] *Datasheet NI PCI 6221. National Instruments.* Disponible en: http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-15.

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

23. Controlador Difuso para el Novint Falcon

Mendoza Villegas Fernando de Jesús, Trujillo Cárdenas Xavier, Charre Ibarra Saida Miriam, Gudiño Lau Jorge, Alcalá Rodríguez Janeth Aurelia

scharre@ucol.mx

Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Electromecánica
Manzanillo, Colima, C.P. 28860

Resumen

En el presente trabajo se muestra el diseño de un controlador basado en lógica difusa, el cual tiene como objetivo llevar a la posición deseada el efector final de un robot paralelo tipo delta.

El Controlador difuso se implementó utilizando la librería Fuzzy de Simulink® en Matlab®, en la sección de análisis de resultados se presentan las gráficas obtenidas en el seguimiento de la trayectoria programada para demostrar el funcionamiento del controlador.

Palabras clave: Novint Falcon, robot tipo delta, Controlador Fuzzy, Funciones de membresía, Universo de discurso.

1. Introducción

Reymond Clave en 1990 presenta un dispositivo para el movimiento y posicionamiento de un elemento en el espacio, el robot tipo Delta que permite el control de los tres grados de libertad conservando el paralelismo del elemento móvil con respecto a un soporte fijo [1].

En los últimos años los robots delta se están aplicando a nivel industrial como manipuladores en línea de empacado de alta velocidad por compañías como Bosch, ADEPT, ABB Robotics, entre otras [2]. La configuración también la han adoptado dispositivos hápticos tales como Novint Falcon.

El Novint Falcon se muestra en la Figura 1 y Figura 2. Este dispositivo háptico es de tres grados de libertad y presenta retroalimentación de fuerzas en x, y, z. Lo que permite sentir textura, forma y peso de objetos virtuales.

Figura 1. Novint Falcon.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

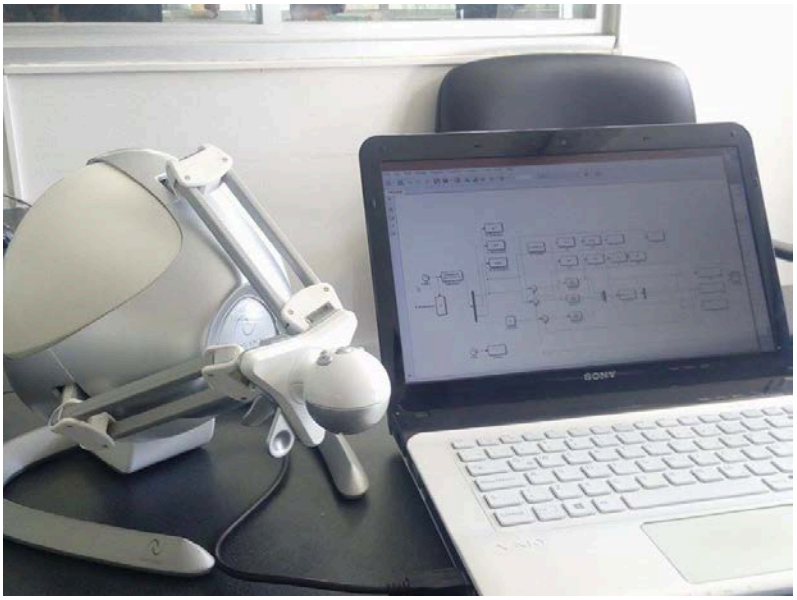


Figura 2. Novint con interfaz a la computadora.

Las no linealidades en la cinemática y dinámica de muchos mecanismos paralelos hacen que las tareas de estimación y control para esta clase de robot sean difíciles utilizando métodos clásicos [3]. Por lo que en el presente trabajo se aplica un control inteligente baso en lógica difusa, rama de la inteligencia artificial que le permite a una computadora analizar información del mundo real en una escala entre lo falso y verdadero.

2. Desarrollo

2.1 Programación de trayectoria

Trayectoria se refiere a un historial en el tiempo de la posición, la velocidad y la aceleración para cada grado de libertad.

En tiempo de ejecución, la rutina generadora de rutas construye la trayectoria, generalmente en términos de θ, $\dot{\theta}$ y $\ddot{\theta}$, y alimenta esta información al sistema de control del manipulador. Este generador de rutas calcula la trayectoria a la frecuencia de actualización de rutas [4].

$$\theta = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \ (1)$$
$$\dot{\theta} = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 + 4a_4 t^3 + 5a_5 t^4 \ (2)$$
$$\ddot{\theta} = 2a_2 + 6a_3 t + 12a_4 t^2 + 20a_5 t^3 \ (3)$$

Donde $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ son coeficientes constantes y t el tiempo.

En base a las ecuaciones de posición (1), velocidad (2) y aceleración (3) se procedió a programar un bloque en Matlab que proporcionará una trayectoria suave a seguir por el Novint Falcon.

```
%///// Planeación de trayectoria //////
function sal = f(u)

 % // Asignación del tiempo de inicio ti y fin tf de la trayectoria.
clock = u(1);
```

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

```
ttotal = 40;
ti = 0;
tf = 40;

%// Cálculo del error del tiempo.
 tfe = tf - ti;
 t = clock;

%// Determinación de la posición incial y final.
 q0 = -35;
 qf = 35;

%// Solución de la trayectoria deseada por un polinomio de 5° orden.
 A = [ tfe^3 tfe^4 tfe^5;
 3*tfe^2 4*tfe^3 5*tfe^4;
 6*tfe 12*tfe^2 20*tfe^3];
 Ai = inv(A);

 X = [qf-q0;
 0;
 0];

 bx = Ai*X;

 a3x=bx(1,1); a4x=bx(2,1); a5x=bx(3,1);

 %// Generación de una trayectoria suave obteniendo posición, velocidad y aceleración.
 qd = q0 + a3x*(t^3) + a4x*(t^4) + a5x*(t^5);
 qdp = 3*a3x*(t^2) + 4*a4x*(t^3) + 5*a5x*(t^4);
 qdpp = 6*a3x*(t) + 12*a4x*(t^2) + 20*a5x*(t^3);

sal(1) = qd;
sal(2) = qdp;
sal(3) = qdpp;
```

2.2 Diseño del controlador difuso

Las computadoras manejan datos precisos que se reducen a cadenas de unos (1) y ceros (0) y proposiciones que son ciertas y falsas. El cerebro humano puede razonar con información que involucra incertidumbre o juicios de valor como: “el aire es frío” o “la velocidad es rápida”.

La Figura 3 muestra las etapas que constituyen el control difuso.

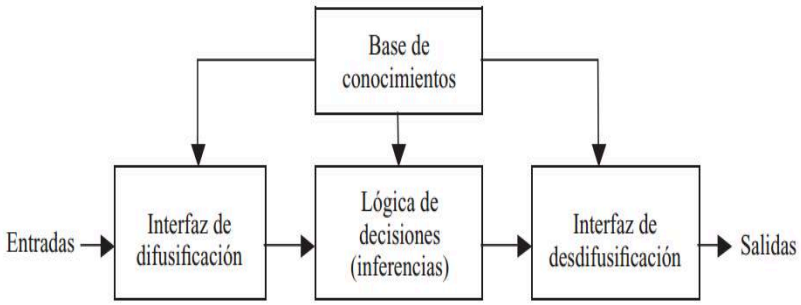


Figura 3. Estructura de un controlador difuso.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Interfaz de difusificación: Mide los valores de las variables de entrada para realizar un mapeo a escala que transfiere el rango de valores de las variables a un universo de discurso difuso. La difusificación convierte los datos de entrada en valores lingüísticos que son las etiquetas de las funciones de pertenencia o conjuntos difusos.

Lógica de decisiones: La lógica utilizada para tomar decisiones dentro de un controlador difuso es el núcleo del mismo. A partir de la misma se simula la lógica que utilizan las personas para tomar decisiones, con base en conceptos difusos y en la inferencia de acciones de control, empleando implicaciones y las reglas establecidas según la base de conocimientos.

Interfaz de desdifusificación: La interfaz de desdifusificación se encarga del mapeo a escala que convierte el rango de valores de las variables de salida a sus universos de discurso correspondientes. La desdifusificación es la herramienta para obtener la acción de control nítida a partir de una acción de control difusa [5].

Se desarrolló un controlador difuso en Simulink® de Matlab® para la posición “x” y “y” el cual consta de 5 reglas, una entrada y una salida. En la Figura 4 se presenta la pantalla inicial del FIS Editor donde se establecen el número de entradas y salidas.

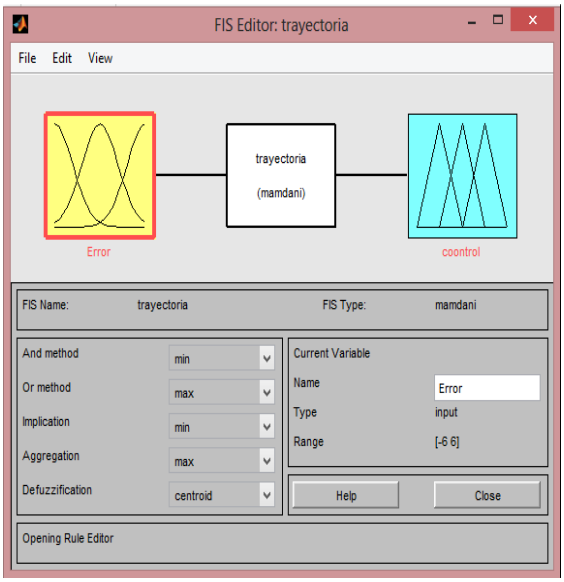


Figura 4. FIS Editor.

Las etiquetas utilizadas en las funciones de membresía presentadas en las Figuras 5 y 6 correspondientes al bloque de control de la posición del efector final del NOVINT se presentan en la tabla 1.

Tabla 3. Etiquetas de las funciones de membresía.

Para las variables de entrada :		**Para las variables de salida :**	
Etiqueta	**Nombre**	**Etiqueta**	**Nombre**
• n	negativo	• N	NEGATIVO
• ncero	negativo cercano a cero	• NCERO	NEGATIVO CERCANO A CERO
• Cero	cero	• CERO	CERO
• Cerop	positivo cercano a cero	• CEROP	POSITIVO CERCANO A CERO
• P	positivo	• P	POSITIVO

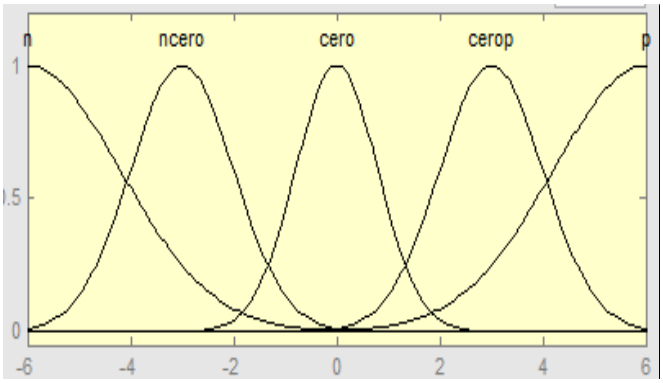


Figura 5. Funciones de membresía en la entrada.

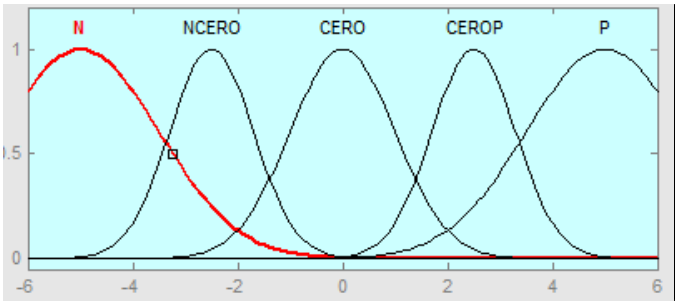


Figura 6. Funciones de membresía en la salida.

Las reglas que dictan la acción de control, derivadas de la experiencia con el dispositivo, se presentan en la Figura 7.

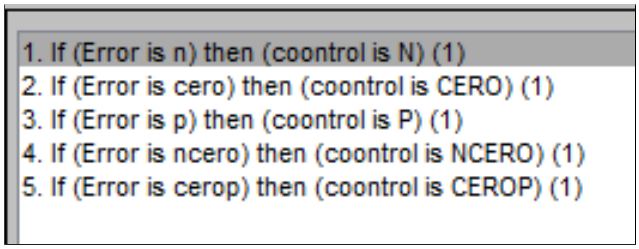


Figura 7. Reglas de control difuso.

La Figura 8 muestra el programa en Simulink® de Matlab® del controlador difuso diseñado para el Novint Falcon.

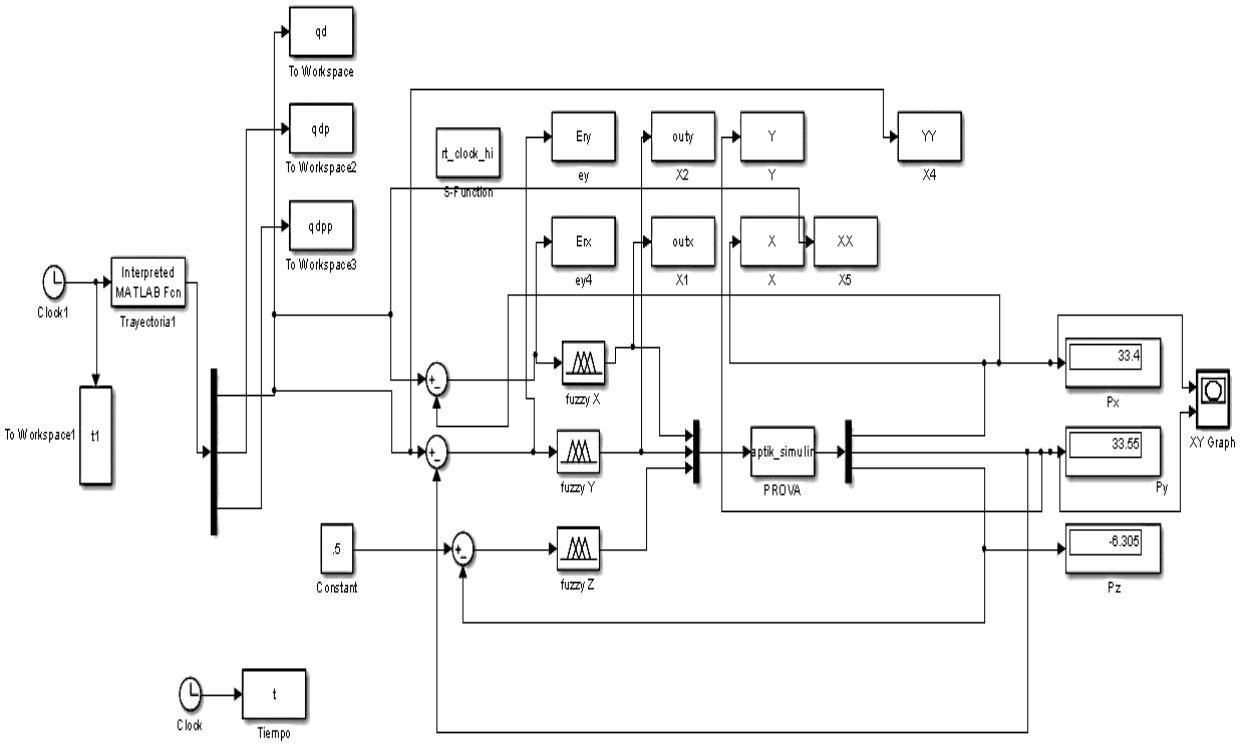


Figura 8. Diagrama en Simulink.

3. Análisis de resultados

Para verificar el diseño del controlador difuso se le aplicó como trayectoria a seguir una rampa, en la Figura 9 se presenta la trayectoria obtenida por el efector final del Novint.

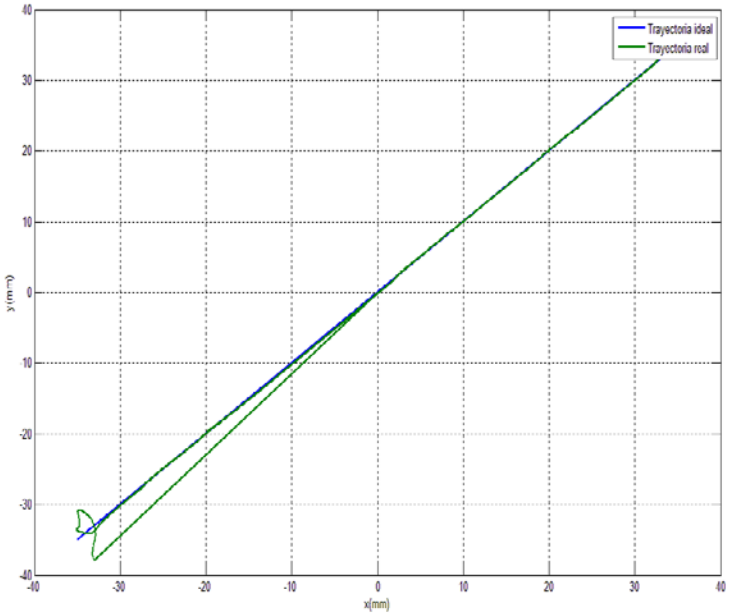


Figura 9. Trayectoria ideal y real.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

La Figura 10 muestra la señal de error que se obtuvo en la posición x.

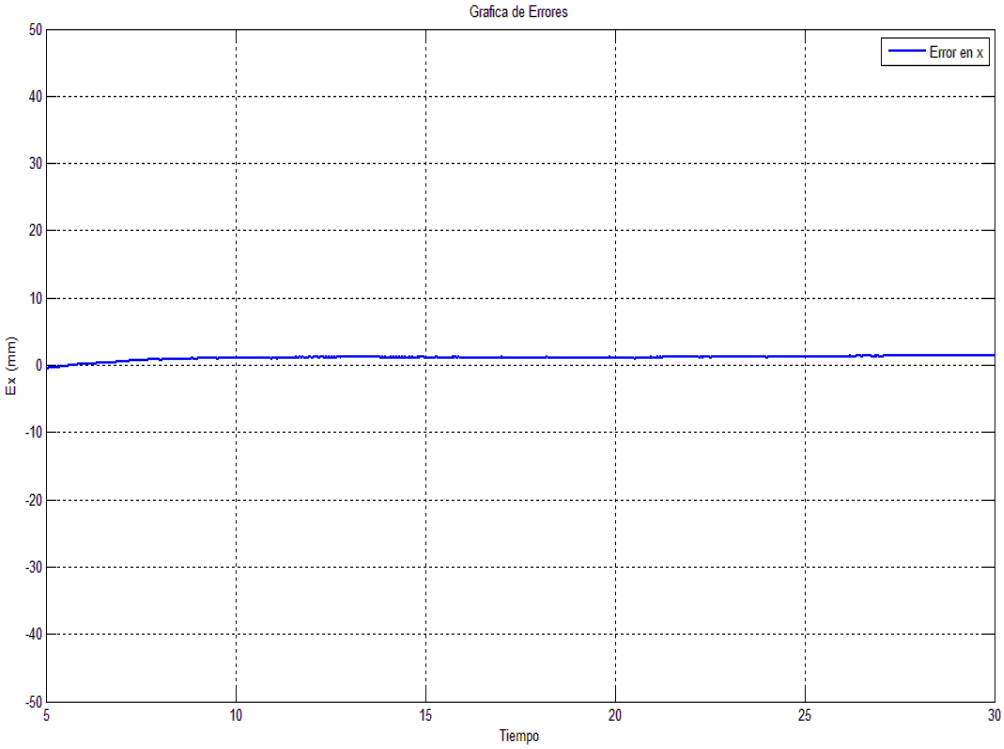


Figura 10. Error en la posición x.

En la Figura 11 se presenta la señal de control aplicada al Novint para lograr la trayectoria deseada.

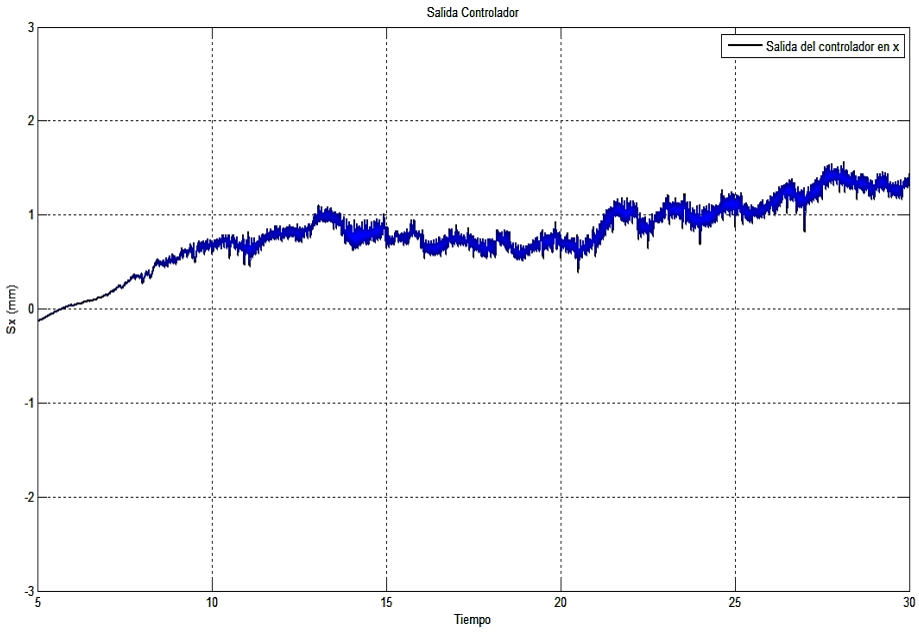


Figura 11. Salida del controlador en x.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

La Figura 12 muestra el error de la posición y obtenido, este error es la diferencia de la trayectoria deseada y la real.

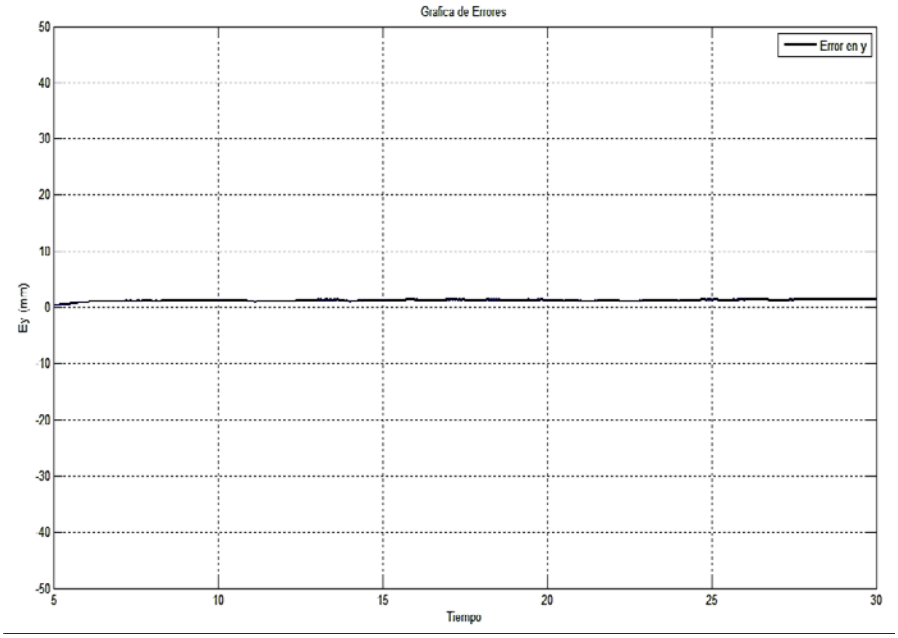


Figura 12. Error en la posición y.

En la Figura 13 se observa la señal del controlador difuso para la posición y requerida por la trayectoria.

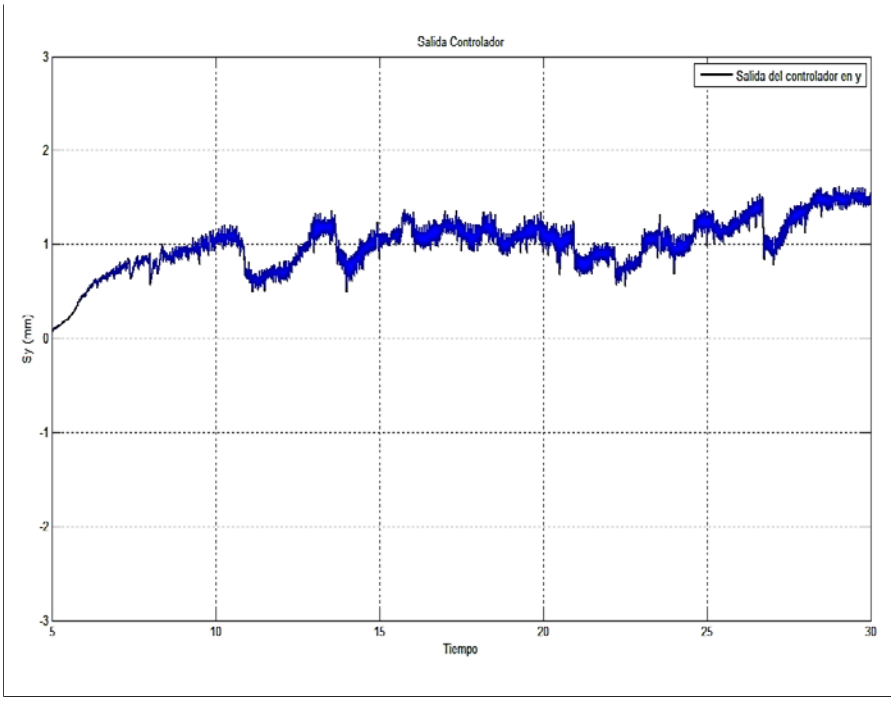


Figura 13. Salida del controlador en y.

4. Conclusiones

La lógica difusa se puede usar para el control de sistemas muy complejos o sistemas no tan complejos, permitiendo una metodología de diseño sencilla del control, en el presente trabajo se diseñó un controlador difuso para el Novint Falcon, el cual requiere de una respuesta muy rápida de las salidas para lograr seguir la trayectoria y llegar al punto deseado. Durante la experimentación se establecieron una serie de ecuaciones para definir la trayectoria del robot tipo delta. Donde se determina la posición inicial y final deseada para el efector final del Novint Falcon. Posteriormente se programaron las reglas del controlador difuso en base a la experiencia obtenida con el dispositivo háptico.

Se aplicaron pruebas experimentales para probar el desempeño del controlado difuso, instalando en una computadora los controladores necesarios para el uso del Novint Falcon.

El controlador logra un error en estado estable de máximo 1 mm, y un tiempo de establecimiento desde la posición inicial a la final de 12.5s.

Trabajos futuros incluyen el diseño de controladores difusos para trayectorias circulares con diseño de ambientes virtuales e interfaces hápticas.

Referencias

[1] Clavel R. *Device for the movement and positioning of an element in space*. United States Patent, 1990. Patent Number: 4976582.
[2] Martínez E., Peña C., Yime E. *"Diseño óptimo de un robot paralelo con configuración delta para aplicaciones educativas"*, Revista Educación en Ingeniería, ISSN 1900-8260. 110-119, Diciembre, 2010.
[3] Martin S., Hillier N. *"Characterisation of the Novint Falcon Haptic Device for Application as a Robot Manipulator"*, Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA), Sydney, Australia, December 2-4, 2009.
[4] Craig J. *"Robotica"*, Pearson, México, 2006.
[5] Ponce P. *"Inteligencia Artificial con aplicaciones a la ingeniería"*, *Alfaomega*, México, primera edición, 2010.

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

24. Prototipo de automatización industrial, llenado y tapado de cajas

Méndez Guzmán Hugo Antonio, Ledesma Silva Gabriel Daniel, Sierra Martínez Carlos, Hernández Rangel Omar Alexis, Sánchez Rocha José Manuel

hmendezg@upbicentenario.edu.mx;

Universidad Politécnica del Bicentenario
Carretera Silao-Romita km. 2, San Juan de los Duran, C.P. 36283. Tel. (472) 72 38 700

Resumen

Se describe, la implementación de un proceso de automatización de llenado y empaquetado de cajas, este proceso se realiza enlazando varias tecnologías: sensores y actuadores eléctricos y electroneumáticos, un sistema de visión para inspección dimensional, así como la implementación de un brazo robótico para el transporte de materiales y la unidad de control para la ejecución del programa y toma de decisiones a través de un PLC siemens S7300, en un prototipo de proceso industrial.

Palabras clave: Robótica, Controlador Lógico Programable, Sistemas de visión, Sistemas avanzados de manufactura, Automatización.

1. Introducción

Una célula de manufactura flexible es un sistema integrado por dos o más estaciones de procesos automatizados, enlazadas mediante un sistema para manejo y control de movimiento de materiales cuyo objetivo es fabricar uno o más unidades de un mismo producto en corto plazo, esto es útil para el desarrollo de un proceso industrial [3], tal que en sus procesos se puedan insertar nuevas tecnologías y rediseñar los mismos para fabricar otro producto semejante al establecido [4].

Un controlador lógico programable o P.L.C (Programmable Logic Controller) es un computador especialmente diseñado para automatización industrial, cuyas funcionalidades permiten el control de una maquina o proceso industrial, para nuestro caso, ese proceso es el llenado y empaquetado de cajas [5], entre las aplicaciones generales de un PLC se encuentran la maniobra de máquinas, maniobra de instalaciones, señalización y control; el PLC es la mente de todo el proceso, el cual podemos programar mediante diagramas espacio-fase las secuencias de cada área.

La visión artificial es una disciplina que engloba todos los procesos y elementos, esta proporciona ojos a una máquina. La visión artificial o comprensión de imágenes nos describe la deducción automática de una estructura y propiedades de un mundo tridimensional [2], para nuestro caso el sistema de visión tiene la función de captar la imagen en tiempo real para realizar un procedimiento de inspección dimensional, de tal manera que si en el proceso se suministra una caja de dimensiones erróneas, el proceso expulse de la línea de producción dicha caja, asegurando que la etapa de colocación de la tapa se realice de forma correcta y que el gripper del brazo robótico pueda realizar el transporte de un lugar a otro el producto.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Para este proceso se implementó un robot de 5GDL, el primer grado de libertad es un eje lineal, todos los grados de libertad siguientes son rotativos. Este robot se encarga de la manipulación de cajas, con la tarea de pasarlas de una banda transportadora a otra de forma precisa. Hay muchos métodos que se podrían realizar para esta operación, sin embargo conllevaría el uso de cilindros y mecanismos, confinado a un área de trabajo reducida para la maniobrabilidad del producto, mientras por el otro lado el uso de un brazo robot puede adaptarse a tareas cambiantes en un espacio de operación más amplio.

A continuación se describen las principales etapas que conforman el proceso de automatización.

2. Descripción del proceso automatizado

El proceso soluciona el problema de inspección dimensional de cajas a través de una banda transportadora para aseguramiento del llenado como el vaciado de algún producto en ellas, la manipulación de posición de las cajas y finalmente el tapado. En la figura 1 se puede apreciar un croquis del sistema implementado.

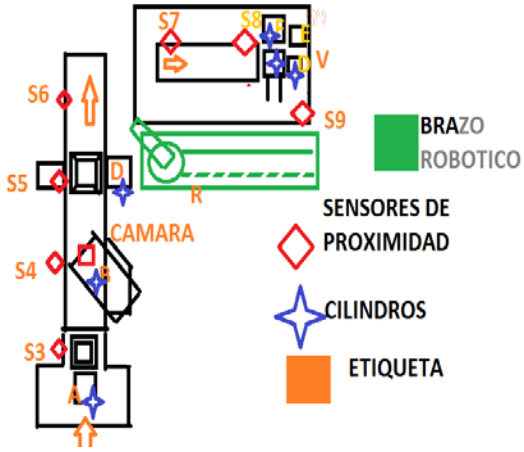


Figura 1. Croquis de la descripción del sistema de automatización.

La secuencia del proceso se puede describir por medio del diagrama espacio-fase mostrado en la figura 2.

Donde M1, M2 son motores de C.D.; S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9 son sensores de proximidad; A, B, C, D, E, F son cilindros neumáticos; A0, A1, B0, B1, C0, C1, D0, D1, E0, E1, F0, F1 sensores de fin de carrera para los cilindros neumáticos; VEN una ventosa para sujeción de la caja en el cartucho de tapado; CAMARA es una señal eléctrica que produce el sistema de inspección en el caso de que la caja no cumpla las dimensiones especificadas; ME y ME5 banderas para la memorización de estados del proceso.

2.1. Abastecedor de cajas

Esta etapa del proceso tenemos primero un depósito de cajas en forma prisma rectangular, donde por medio de la gravedad y el uso de un cilindro se posicionan en la banda transportadora (figura 3), en la parte inferior de esta hay un cilindro A cuya función es empujar la caja en cuando comienza el arranque del proceso , enseguida hay un sensor de proximidad S3 que manda una señal en alto cuando llega la caja a la banda transportadora 1 y el motor M1 se activa para que la caja avance hasta llegar donde se encuentra otro sensor de a proximidad situado en la etapa de inspección dimensional.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

2.2. Inspección de dimensiones del recipiente.

La inspección de la caja es por medio de una cámara, si esta tiene las dimensiones correctas cuando termine el conteo la caja va a seguir por la banda, y si las dimensiones no son las correctas, un cilindro B que esta normalmente es su estado de avance, pasa a su estado de retroceso. Este cilindro desactiva B1 activa posteriormente B0, esto produce que una palanca se mueva y la caja con las dimensiones incorrectas salga de la banda, si esto sucede, el cilindro A se activa para soltar otra caja del abastecedor. Una vez que la caja ha pasado la etapa inspección, el motor M1 se activa para que la caja llegue hasta donde se encuentra S5, sensor cuya función es desactivar a un cilindro C que está obstaculizando para dar salida al producto.

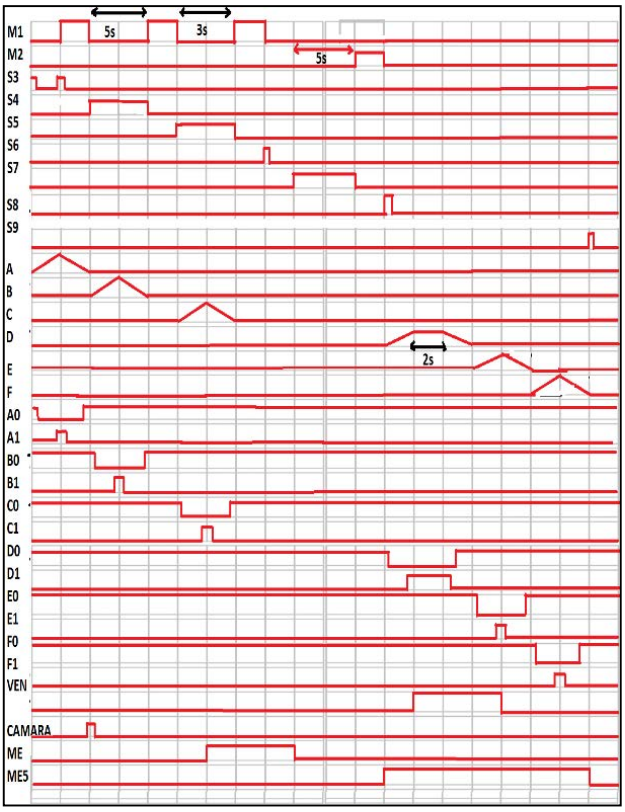


Figura 2. Secuencia de operación del proceso.

Figura 3. Abastecedor cajas.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Figura 4. Sistema de clasificación mecánico.

2.3. Depósito de pastillas con un embudo.

A partir del proceso anterior la caja activa el sensor S4, por lo que el motor M1 se detiene y el cilindro C deja caer el producto en la caja, abre la compuerta del embudo e inmediatamente cierra, después de 3s., el motor M1 se vuelve activar y enseguida la caja llega a donde se encuentra el sensor S6, este sensor es el indicador para que el motor M1 sea desactivado.

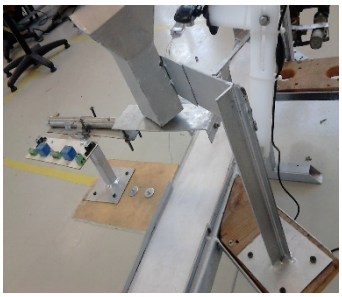


Figura 5. Depósito de pastillas.

2.4. Traslado de cajas por medio de un manipulador.

El brazo robótico toma la caja, siguiendo una trayectoria para llevarlo a otra banda transportadora (banda 2) a través del motor M2 (actuador lineal del brazo), entonces el brazo deja la caja en una posición de la banda 2 donde se encuentra el sensor S7, la coloca en su lugar, el brazo se retira y regresa a su estado de standby, posteriormente el sensor S7 permite que la banda se active después de 5s para asegurar que el brazo ya no está en la zona de movimiento de la caja y la banda (M2) se activa y hace que la caja llegue hasta el final de la banda, donde esta es sellada con su tapa.

2.5. Área de tapado.

Cuando una caja llega al final de la banda, un sensor S8 la detecta y manda una señal para que M2 se detenga, y un cilindro D con una ventosa y una válvula de vacío tome la caja, espera 2s para asegurar de que se toma la caja y la introduce en un cartucho, donde un cilindro vertical E y otro cilindro F perpendicular al anterior son activados secuencialmente para colocar la tapa y empujar la caja para que salga del cartucho hacia una rampa; posteriormente la detecta otro sensor S9, quien activa de nuevo al cilindro A para colocar otra caja en la banda, y hacer que el brazo robótico se mueva para retirar la caja de la rampa y colocarla en otro deposito. Este proceso se repite 5 veces, dando fin al ciclo de trabajo del proceso (figura 1).

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

3. Descripción del sistema de visión

El sistema de visión se encarga de la medición de las cajas con los datos del diseño, asegurando que las mediciones cumplan con las especificaciones. El sistema de cámaras está posicionado tal y como se muestra en la figura 6.

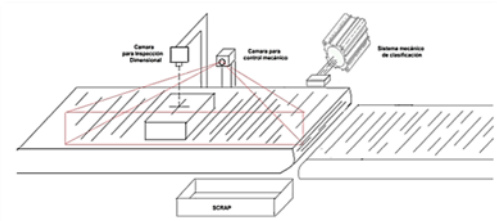


Figura 6. Sistema de calibración e inspección de calidad basada en un sistema de visión.

Para la inspección de dimensiones se realizó un GUI en Matlab (figura 7) el cuál se basa en la medición planar de objetos [6] y un patrón de calibración *checkerboard* de 1mm, tal que el procesamiento de imagen arroje las dimensiones reales del objeto y en base a una comparación con la medida standard de la caja, esta pueda ser o no rechazada.

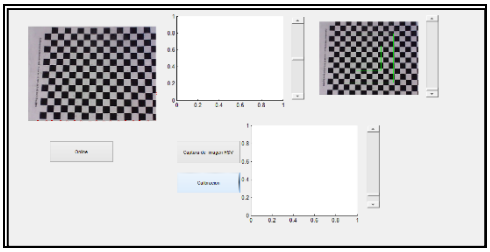


Figura7. GUI de Calibración en tiempo real para inspección dimensional.

La etapa de procesamiento se puede resumir en la adquisición de la imagen, segmentación y extracción de características del objeto, para nuestro caso la detección de bordes y esquinas para realización del dimensionamiento de la caja (figura 8), tal que en base al inspección dimensional se toma una decisión de activación o no activación del sistema mecánico de rechazo a través de una señal eléctrica dirigida a la entrada CAMARA del PLC (figura 2).

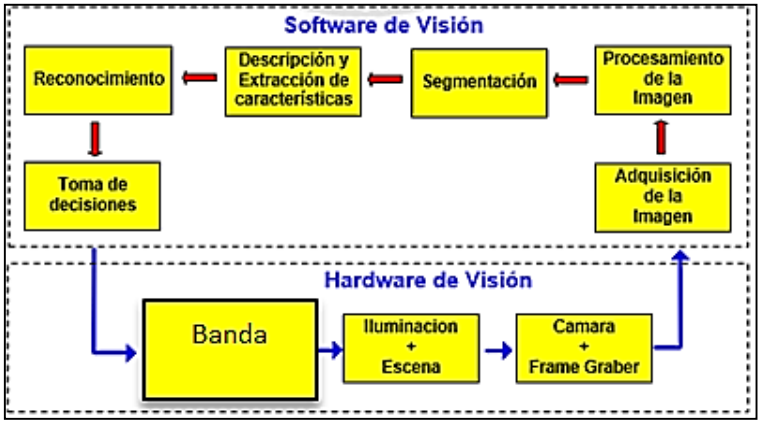


Figura8 Sistema de visión por Bloques.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

4. Descripción del sistema de traslado de cajas por Manipulador Robótico

Dado que un robot se puede considerar como una cadena cinemática formada por objetos rígidos o eslabones unidos entre sí mediante articulaciones, se puede estableces un sistema de referencia fijo situado en la base del robot y describir la localización de cada uno de los eslabones con respecto a dicho sistema de referencia para poder realizar la programación de trayectorias para el traslado de las cajas del sistema propuesto.

La cinemática directa es el álgebra vectorial y matricial para representar y describir la localización de un objeto en el espacio tridimensional con respecto a un sistema de referencia fijo. De esta forma el problema cinemático directo e reduce a encontrar las matriz homogénea T que será función transformación que relaciona la poción y orientación del extremo del robot con la base del mismo. Esta matriz T será la función de las coordenadas articuladas [1].

El objetivo del problema cinemático inverso consiste en encontrar los valores que deben adoptar las coordenadas articulares del robot $q=[q1,q2…qN]^T$ para que su extremo se posicione y oriente según un determinada localización espacial.

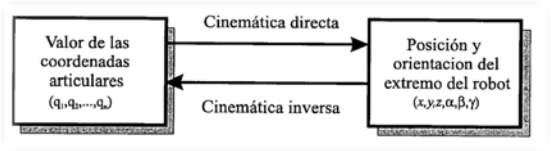


Figura 9. Cinemática directa, inversa y su relación con la posición y orientación del extremo del robot.

Para obtener la cinemática directa del brazo usamos los pasos del algoritmo Denavit-Hartenberg, mientras que el modelo del prototipo fue diseñado en SolidWorks donde se muestran los pasos, la asignación de los eslabones, articulaciones y ejes para sacar los cuatro parámetros de D-H (θ, d, a, α).

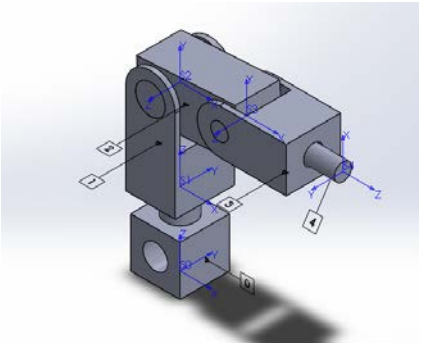


Figura 10. Parámetros de Denavit Hartenberg, ejes y eslabones.

Estos parámetros dependen únicamente de las características geométricas de cada eslabón y de las articulaciones que le unen con el anterior y siguiente. Los parámetros encontrados de D-H para el robot angular de nuestra aplicación se muestran en la tabla 1.

El brazo robótico tendrá una posición de HOME y ejecutará dos rutinas diferentes, la primera cuando el sensor S6 detecte la caja, para lo cual el brazo realiza una rutina para trasladar la caja de una banda transportadora a otra, y la segunda cuando el sensor proximidad S9 detecte la caja, para que el brazo realice la rutina para colocar el producto ya terminado, en un depósito. Al terminar cualquiera de los dos procesos regresará a HOME.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Tabla 1. Parámetros de D-H para el robot angular.

Articulaciones	θ	d	a	α
1	Q1	L1	0	0
2	Q2	L2	0	90°
3	Q3	0	L3	0
4	Q4+90	0	L4	90°

5. Sistema de control basado en PLC.

El sistema de control es a través de un programa estructurado en lenguaje KOP para un PLC SIEMENS S7-300, cuya lógica de diseño es basada en un método intuitivo de programación de PLCs y en la secuencia de operación de la figura 2.

En la figura 11 se muestran los planos de entradas y salidas digitales del sistema propuesto.

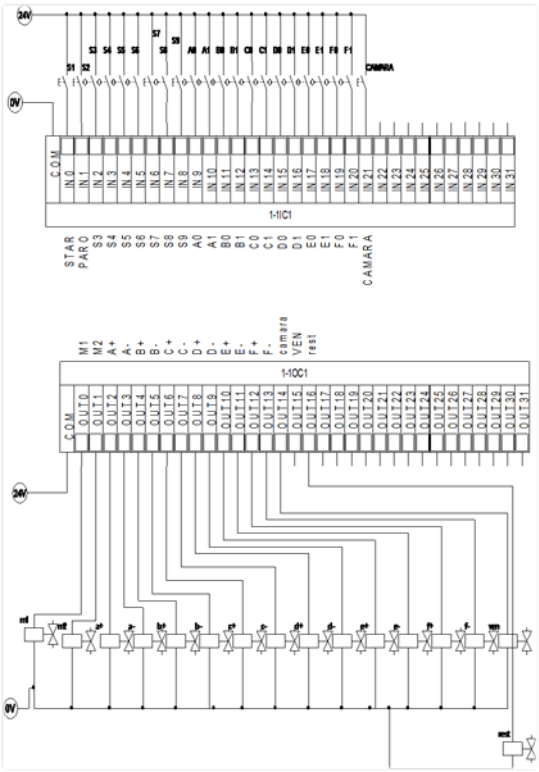


Figura 11. Plano entradas y salidas digitales.

Para la puesta en marcha se realizó una simulación bajo el software Automación Studio, el cual permite la interacción con el lenguaje KOP, así como con esquemas eléctricos, electromecánicos, electroneumáticos y de control. El circuito neumático de la aplicación se pueden observar en la figura 12, mientras en la figura 13 se muestra el ladder para control de cilindros y motores para el control del prototipo.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Por otra parte, el sistema automatizado propuesto trabaja bajo el uso del CPU313 de siemens, el cual consta de 16 entradas y 16 salidas digitales, por lo que al tener 21 entradas para el proceso se implementó una adaptación de hardware para poder manipular todos los sensores de proximidad.

Dado que se requieren 7 sensores de proximidad para el proceso de las 21 entradas digitales, se acoplo un codificador binario de prioridad (tabla 2), tal que las 7 entradas digitales pudieran expresarse a través de tres bits hacia el PLC, para posteriormente realizar su decodificación en el programa a través de lenguaje KOP (figura 14).

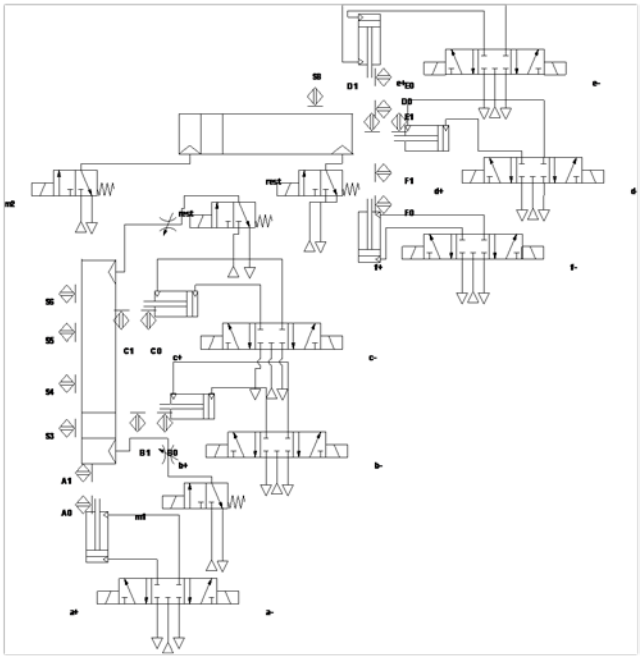


Figura 12. Circuito neumático.

Tabla 2. Codificador de Sensores de Proximidad

Sensores de Proximidad							Salida codificada		
S9	S8	S7	S6	S5	S4	S3	X	Y	Z
L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
L	L	L	L	L	L	H	L	L	H
L	L	L	L	L	H	X	L	H	L
L	L	L	L	H	X	X	L	H	H
L	L	L	H	X	X	X	H	L	L
L	L	H	X	X	X	X	H	L	H
L	H	X	X	X	X	X	H	H	L
H	X	X	X	X	X	X	H	H	H

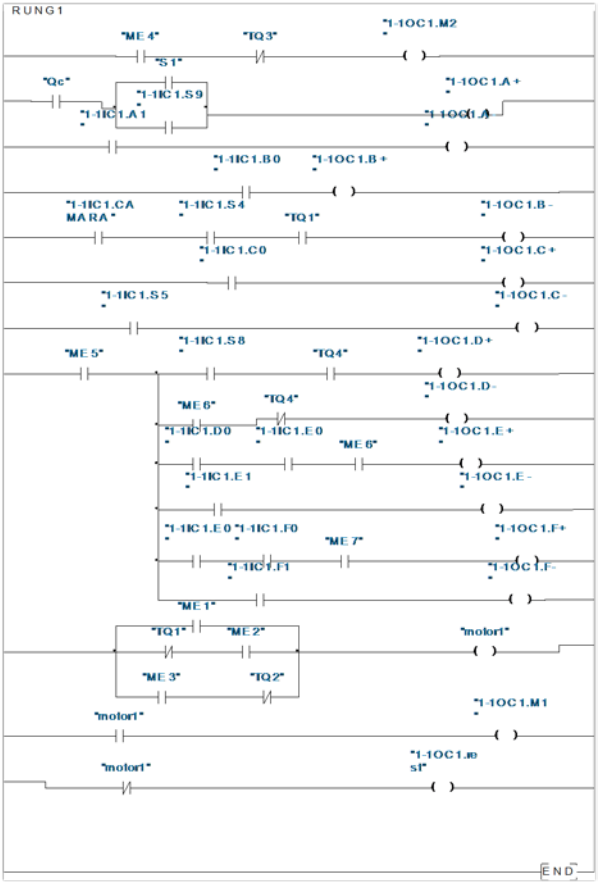


Figura 13. Ladder para control de cilindros y motores.

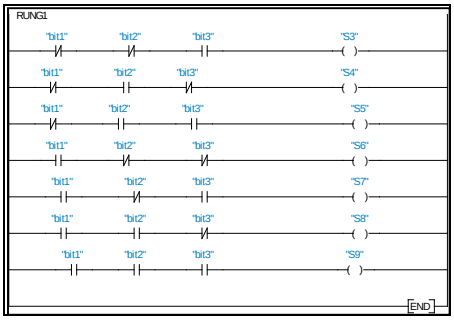


Figura 14. Ladder para decodificación de sensores.

6. Resultados

Se implementó un proceso secuencial en PLC para los accionamientos de varios actuadores en un sistema de llenado y tapado de cajas, además de la implementación de un sistema de visión para la inspección dimensional de estas sobre la banda. Para el control de la banda se utilizó un microcontrolador con referencia a la cámara, ya que una vez que la cámara toma la decisión de avance y rechazo de la caja manda una señal eléctrica al PLC para producir el avance de la banda

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

transportadora. El proceso implementado en el proyecto son viables para cualquier proceso de producción en el ámbito de la industria, ya que los sistemas de producción industrial cuentan con tecnologías acopladas como sensores, PLC y sistemas de visión para el control de mecanismos y control de calidad en los productos.

Se cumplió con el objetivo de llenado, inspeccionado (dimensiones), tapado y trasladado a un área de almacenamiento (Figura 15). El sistema ya está en marcha, pero actualmente se verifica la parte mecánica y la parte eléctrica que este en óptimo funcionamiento.

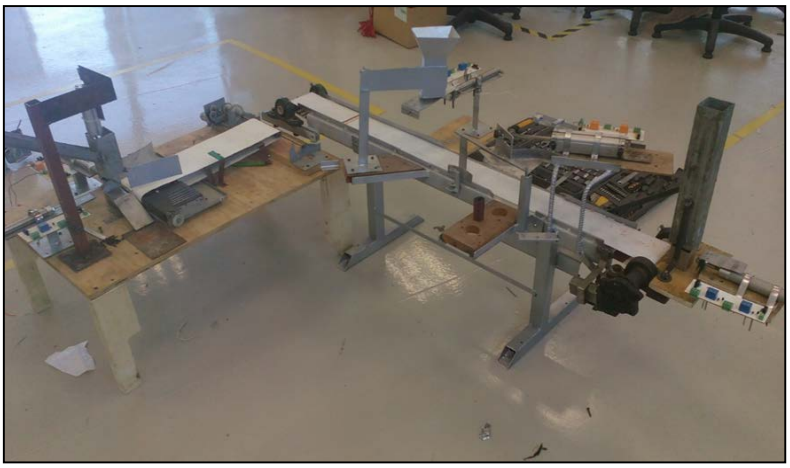


Figura 15. Estructura del proceso implementado.

7. Conclusiones

Al realizar este proyecto de automatización nos damos cuenta de la importancia, y los subprocesos que conlleva el funcionamiento de un proceso industrial, además de las diferentes posibilidades que se pueden adoptar en una automatización, y llegar a una solución adecuada para el proceso que se quiere realizar. Para poder resolver estos problemas de automatización, se tiene que tener un amplio conocimiento de métodos de automatización, control, sensores, instrumentos, herramientas, creatividad e ingenio en áreas de programación de PLC, Visión Artificial, Sistemas Avanzados de Manufactura y Robótica.

Referencias

[1] Barrientos, A., Peñin, L., Balaguer, C. *"Fundamentos de Robótica"*, McGraw, 2da Edición.
[2] Gonzalez, M., Martínez, F., Pernia A. *"Técnicas y algoritmos básicos de visión artificial",* España, 2006.
[3] Roldan, V. *"Automatismos Industriales",* Editorial Paraninfo, 2008.
[4] Ebel, F., Idler, S., Prede, G., Scholz, D. *"Fundamentos de la técnica de automatización",* Festo Didactic, Alemania, 2007.
[5] Pitarch, P. *"STEP 7: Una Manera Fácil de Programar PLC de Siemens",* Marcombo, 2009.
[6] Zhang, Z. "A flexible new technique for camera calibration". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11): 1330-1334, 2000.

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

25. Sistema de visión para reconocimiento y búsqueda de formas aplicado a robots móviles

Méndez Guzmán Hugo Antonio, Flores Muñoz Víctor Hugo, Ramírez Arrona Sergio Antonio, Luna Padilla Noe, Soria Rodríguez Oscar

hmendezg@upbicentenario.edu.mx;

Universidad Politecnica del Bicentenario
Carretera estatal Silao-Romita Kilómetro 2, San Juan de los Durán, Silao Guanajuato, México

Resumen

Se describe la implementación de una interfaz entre Matlab y de un robot móvil para la búsqueda y acercamiento a objetos a través del reconocimiento de formas geométricas. Para la toma de decisiones se utiliza una red neuronal en conjunto con un sistema de visión capaz de procesar imágenes. La red neuronal se entrena a partir de los momentos invariantes de Hu para cada figura que se desea clasificar. Para la obtención de información se utiliza una tarjeta Arduino y una cámara para la detección del entorno del robot.

Palabras clave: Redes neuronales, robótica móvil, momentos de Hu.

1. Introducción

Hoy en día, los sistemas robóticos y automatizados se han vuelto parte de nuestra vida diaria, cada vez requieren menos intervención de los humanos, aun así los sistemas más avanzados se encuentran por lo general en la industria manufacturera, aunque para la robótica móvil, existen más áreas de aplicación, una de ellas y posiblemente la más notable, es la exploración, tarea que requiere de equipos capaces de acceder a ambientes poco seguros para el humano. La robótica móvil ofrece un gran número de posibilidades para disminuir o contrarrestar los efectos colaterales de actividades en ambientes hostiles, desde sistemas operados a control remoto hasta sistemas autónomos.

2. Descripción del proyecto

El robot estará basado en un carro de cuatro ruedas con un chasís capaz de cargar el sistema de control y además la cámara, así mismo se utilizarán encoders para el control de la velocidad y posición.

El controlador utilizado será Arduino. Estos dispositivos permitirán realizar la adquisición de datos de los sensores y a su vez enviarla a la computadora.

La adquisición de imágenes se pretende sea por medio de una cámara inalámbrica montada en el chasís del robot, esta permitirá obtener imágenes en tiempo real y enviarlas a la computadora para su procesamiento.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

2.1 Cinemática del Robot

Podemos describir la pose del robot como un vector de tres elementos. Observe el uso del subíndice I para aclarar la base de esta postura como el marco de referencia global:

$$\xi_I = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\xi_R = R(\theta)\xi_I \tag{3}$$

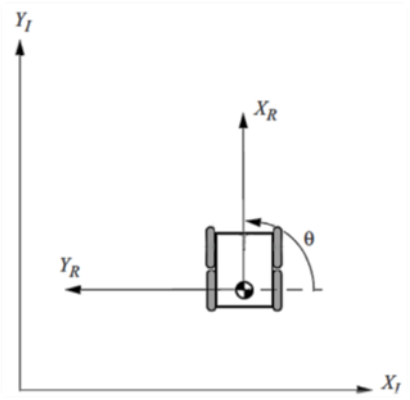


Figura 13. El marco de referencia global y el marco de referencia local robot.

Donde *x*, *y* representan la posición del robot en el marco de referencia global, y la diferencia angular entre los marcos de referencia globales y locales está dada por □, R(□) repres del el movimiento en el marco de referencia global {X1, Y1} al movimiento en términos del marco de referencia local {XR, YR} [6].

2.2 Sistema de navegación

El robot permanece inactivo hasta que en la interfaz se pulsa el botón Snapshot, hecho esto el robot comienza a girar en torno a su centroide, la interfaz comienza a calcular los parámetros de los objetos presentes en la imagen capturada desde la cámara montada en el robot, en base a una variable de entrada el sistema permitirá al robot decidir la acción de seguir girando o avanzar hacia adelante cuando detecte la imagen que se busca, una vez detectada continuará avanzando hasta estar a una distancia de no menos de 10 centímetros, esto último con ayuda del sensor ultrasónico ubicado en la parte frontal del chasís del robot, si este detecta el objeto a 10cm o menos, el robot se detendrá esperando indicaciones del usuario desde la interfaz (figura 2).

2.3 Interfaz de procesamiento de imagen y extracción de características

La interfaz de procesamiento permite conectarse con el robot y realizar el procesamiento y reconocimiento de imágenes en tiempo real, esta se ilustra en la figura 9.

Para la correcta obtención de las características de las imágenes se realizará diferentes operaciones sobre cada tipo de imagen. Estas operaciones se describen enseguida.

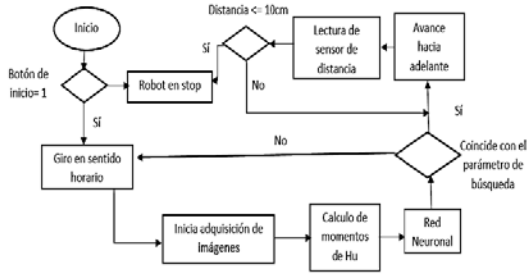
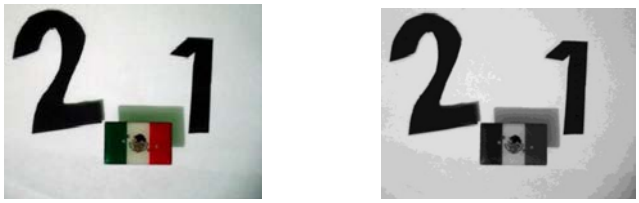


Figura 2. Diagrama de funcionamiento del robot en base a la toma de decisiones.

2.3.1 *Escalado a Grises*

En una escala de grises cada píxel es representado con un único valor entre 0 y 255. Para convertir un píxel de una imagen en color a uno en escala de grises se suele hacer un promedio ponderado de la intensidad de cada uno de los tres colores en donde a cada color se le asigna un peso.

$$gray = 0.2889R + 0.5870G + 0.1140B \tag{4}$$



(a) (b)

Figura 3. Conversión de escala, (a) Imagen original, (b) Imagen en escalas de grises.

2.3.2 Filtrado Gaussiano

Para realizar un procesamiento de suavizado sobre la imagen para la eliminación del ruido, para realizar esto es necesario reducir la amplitud de las variaciones de la imagen, una forma simple de hacer esto, es reemplazar cada píxel por la media del valor de los píxeles de alrededor, de esta forma las variaciones rápidas de intensidad pueden ser suavizadas y reemplazadas por una transición más gradual, se implementa el filtro Gaussiano (figura 4), esta función tiene en cuenta el peso de los píxeles más cercanos que los alejados. La función realizada por este filtro es la siguiente.

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{\frac{-x^2+y^2}{2\sigma^2}} \tag{4}$$

Donde la “x” es la distancia desde el origen (punto del píxel a tratar) en el eje horizontal, e “y” es la distancia desde el origen en el eje vertical y “ □” es la desvi
Gaussiana.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

(a) (b)

Figura 4. Filtrado gaussiano, (a) Imagen original, (b) Imagen suavizada.

2.3.3 Binarización

La binarización es un proceso que transforma una imagen que está en escala de grises a una imagen en dos colores: blanco y negro. En el caso de este proyecto esto es de gran utilidad para la detección de las piezas ya que estas se distinguen principalmente por su forma o su contorno más que por la intensidad de los pixeles que las componen.

(a) (b)

Figura 5. Binarizado, (a) imagen original, (b) imagen binarizada.

2.3.4 Detección de bordes (Canny)

Para la búsqueda de bordes se decidió la implementación de un filtro Canny tal que este proporcione información sobre el contorno del objeto en la imagen.

(a) (b)

Figura 6. Filtrado Canny, (a) imagen original, (b) Imagen filtrada con algoritmo de Canny.

2.3.5 *Extracción de Características*

Finalmente, después de procesar adecuadamente la imagen, se obtienen las características más significativas que permita diferenciar los objetos a clasificar [1], independientemente del tamaño o inclinación que tenga el objeto en cuestión. Por esta razón es necesario encontrar características que sean invariantes a la rotación y a la escala, es decir, momentos de Hu.

Los momentos geométricos se definen como:

$$\mu_{pq} = \int\int \left(x-\bar{x}\right)^{p} \left(y-\bar{y}\right)^{q} f\left(x,y\right) dydx \tag{5}$$

Donde μ_{pq} es el momento geométrico de orden (p + q), $f(x, y)$ es el valor del pixel en la posición (x, y) de la imagen y $(x - \bar{x})$ es el centroide de la misma. Partiendo de estos momentos podemos obtener μ_{pq}, un momento de orden (p +q) que es invariante a la escala [7].

$$\mu_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^{1+\frac{p+q}{2}}} \tag{6}$$

Sus siete momentos invariantes son:

$$\phi_1 = \mu_{20} + \mu_{02} \tag{7.1}$$

$$\phi_2 = (\mu_{20} + \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2 \tag{7.2}$$

$$\phi_3 = (\mu_{30} - 3\mu_{12})^2 + (3\mu_{21} - \mu_{03})^2 \tag{7.3}$$

$$\phi_4 = (\mu_{30} + \mu_{12})^2 + (\mu_{21} + \mu_{03})^2 \tag{7.4}$$

$$\begin{aligned}\phi_5 = {} & (\mu_{30} - 3\mu_{12})(\mu_{30} + \mu_{12})((\mu_{30} + \mu_{12})^2 \\ & - 3(\mu_{21} + \mu_{13})^2) + (3\mu_{21} - \mu_{03})(\mu_{21} - \\ & \mu_{03})x(3(\mu_{30} + \mu_{12})^2 - (\mu_{21} + \mu_{03})^2)\end{aligned} \tag{7.5}$$

$$\begin{aligned}\phi_6 = {} & (\mu_{20} - \mu_{02})((\mu_{30} + \mu_{12})^2 - \\ & (\mu_{21} + \mu_{03})^2) + 4\mu_{11}(\mu_{30} + \mu_{12})(\\ & \mu_{21} + \mu_{03})\end{aligned} \tag{7.6}$$

$$\begin{aligned}\phi_7 = {} & (3\mu_{21} - \mu_{03})(\mu_{30} + \mu_{12})((\mu_{30} + \\ & \mu_{12})^2 - 3(\mu_{21} + \mu_{03})^2) - (\mu_{30} - \\ & 3\mu_{12})(\mu_{21} + \mu_{03})x(3(\mu_{30} + \mu_{12})^2 \\ & - (\mu_{21} + \mu_{03})^2)\end{aligned} \tag{7.7}$$

3. Sistema de clasificación por Redes Neuronales

Para la clasificación neuronal se utiliza una red neuronal “backpropagation” de 1 neurona, con función de transferencia purelin [3], siendo esta la capa de salida (figura 7).

Donde $\emptyset$ son los momentos invariantes de cada una de las figuras geométricas e y es la salida neural la cual arroja como respuesta un numero entero de 1 a n, donde n será el número total de figuras a clasificar.

Para el entrenamiento de la red se reordenan los momentos invariantes tal que P= [M1…Mn], donde M son los momentos invariantes de cada imagen, y n es el número de imágenes que serán

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

clasificadas. Por otra parte la salida deseada T= [11...1n 21...2n 31...3n 41...4n], y n es el número de momentos invariantes por cada imagen.

Para generar los datos de entrenamiento para la red neuronal se calculan los siete momentos invariantes de Hu, cinco veces para cada imagen generando una matriz de 7x20.

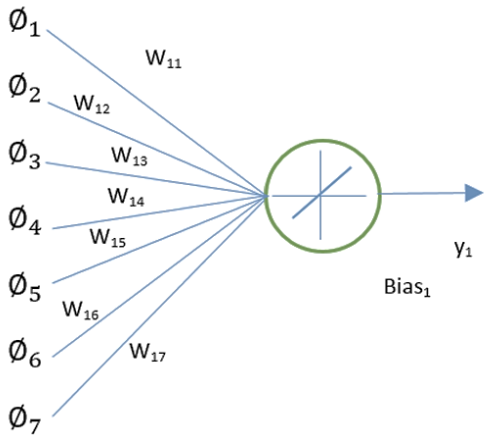


Figura 7. Esquema de la red neuronal.

En la figura 8 se muestra la matriz de datos obtenida para cada conjunto de imágenes.

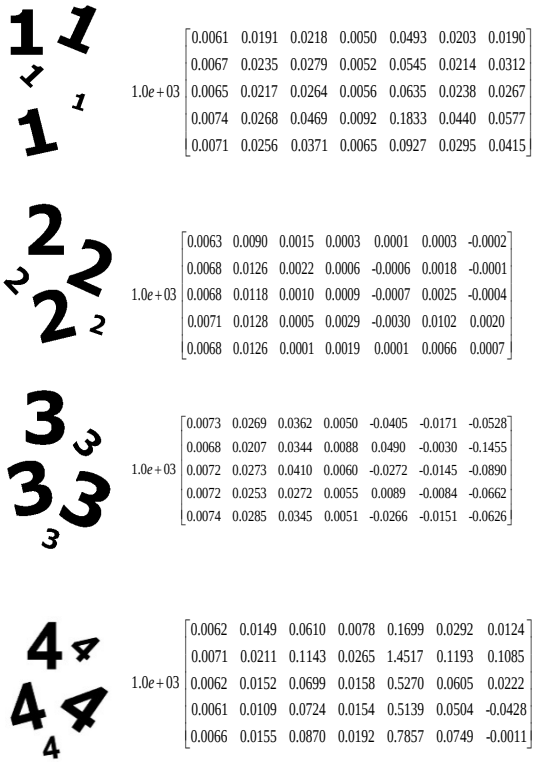


Figura 8. Momentos invariantes de Hu, (a) Patrones escalados y rotados, (b) Momentos de Hu obtenidos.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Donde la salida deseada es:

$$Targets = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \end{bmatrix}$$

Para la implementación y entrenamiento de la red neuronal se utilizó la herramienta *nntool* de MatLab. Los pesos sinápticos obtenidos del entrenamiento son:

$$iw\{1,1\} = \begin{bmatrix} 0.62791 & -0.18536 & 0.041977 & 0.31939 & -0.00029827 & -0.088929 & 0.012623 \end{bmatrix}$$

$$b\{1,1\} = -0.13802$$

4. Análisis de resultados

El sistema de clasificación neuronal en conjunto con el sistema de visión para obtención de momentos invariantes produce como resultados la identificación de caracteres numéricos como se muestra en la figura 9.

Figura 9. Interfaz detectando un carácter.

Por otra parte la respuesta del robot a los requerimientos de la programación, de la interfaz y del usuario fue la esperada, el robot siguió la trayectoria deseada según los parámetros de búsqueda de objetos. Aunque la velocidad de rotación en el propio eje del robot genero ruido en las imágenes adquiridas, por lo anterior se busca mejorar la calidad de la imagen eliminando el ruido provocado por el barrido de la misma; se pretende usar un filtro que lo disminuya, o bien implementar un algoritmo que permita estabilizar la imagen en tiempo real. El robot móvil en el cual se realizaron las pruebas de funcionamiento se muestra en la figura 10.

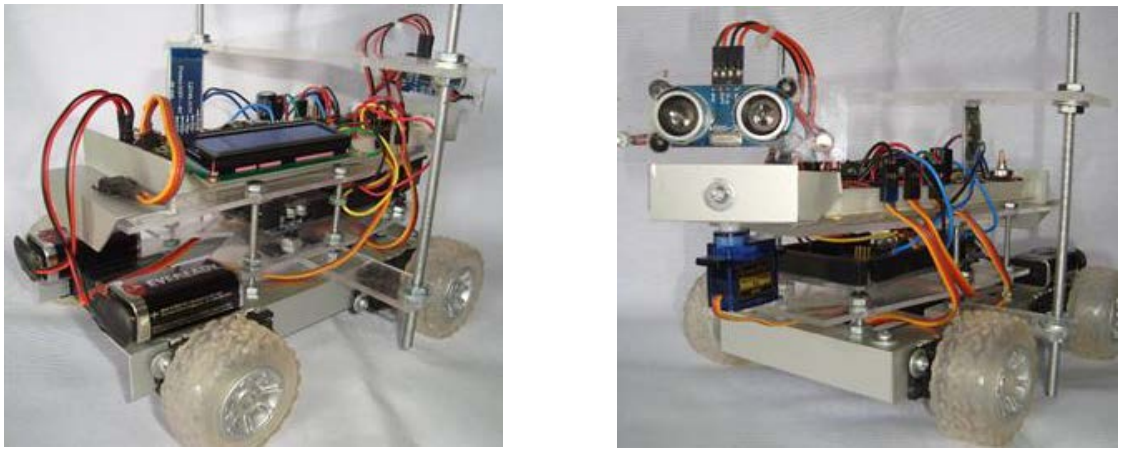


Figura 10. Sistema robótico móvil de prueba.

5. Conclusiones

Los resultados de la investigación son buenos en cuanto al avance esperado, se ha logrado indagar en las redes neuronales, que forman parte primordial en la autonomía de los robots no solo móviles si no también estacionarios. Se pretende indagar más en el procesamiento de imágenes que hasta ahora ha sido el principal problema, existen varias alternativas para mejorar la detección de patrones, una muy posible solución es la utilización del modelo de colores HSV que permite realizar una mejor segmentación de colores, aunque el color no es lo importante para esta investigación no deja de ser parte importante en la clasificación y reconocimiento de formas y patrones ya que es una característica que al igual que el contorno puede ser la necesaria para realizar ciertas clasificaciones, es por ello que se busca una mejora en general tanto del prototipo como como de la red neuronal, en cuanto al prototipo del robot móvil, las posibles aplicaciones hasta el momento son meramente didácticas ya que aún no cuenta con actuadores que le permitan interactúan con su entorno o mejor aún con los objetos que se pretendan y puedan ser reconocidos por la red neuronal.

Referencias

[1] Shih, F. Image Processing and Pattern Recognition – Fundamentals and Techniques. Wiley, 2010.
[2] Solomon, C. and Breckon, T. Fundamentals of Digital Image Processing - A Practical Approach with Examples in Matlab. Wiley-BlackWell, 2011.
[3] Fausett, L. Fundamentals of Neural Networks – Architectures, Algorithms and Applications.
[4] Chow, T. and Cho, S. Neural Networks and Computing – Learning Algoritnms and Applications. Imperial College Press, 2007.
[5] Z. Hendzel. Adaptive Critic Neural Networks for Motion Control of Wheeled Mobile Robot. Nonlinear Dynamics, vol. 50, no. 4, 2007.
[6] R. Siegwart, “Introduction to Autonomous Mobile Robots”, London, 2004.
[7] J. Flusser: "On the Independence of Rotation Moment Invariants", Pattern Recognition, Vol. 33, pp. 1405–1410, 2000

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

26. Visual Control - Automatización de un sistema de envasado utilizando un sistema de visión

Méndez Guzmán Hugo Antonio, Carrillo Delgado Cesar Paul, Rodríguez Álvarez Rubén Darío de la Cruz, López Arredondo Ana Luisa, Fuentes Arias Ezequiel

hmendezg@upbicentenario.edu.mx;

Universidad Politécnica del Bicentenario
Carretera Silao-Romita km. 2, San Juan de los Duran, C.P. 36283. Tel. (472) 72 38 700

Resumen

Se describe el desarrollo de un sistema automatizado de envasado utilizando como único sensor una cámara web. Se utilizan las herramientas de procesamiento de imágenes en Matlab y un PLC como sistema de control de los actuadores y mecanismos un proceso de llenado y tapado de un envase.

A través de Matlab se desarrolla un Software que produce señales de control a partir de las imágenes capturadas por una cámara y un enlace vía microcontrolador para interactuar con un PLC S7-200 que lleva el control de mecanismos y actuadores del proceso.

Palabras clave: Sistemas de control, programación, Matlab, sistemas de visión, PLC, sector industrial, automatización, línea de producción.

1. Introducción

La automatización de procesos industriales es un área de la ingeniería que busca reducir el riesgo de los operadores en tareas peligrosas y repetitivas, mejorar la calidad del producto, aumentando la producción y reduciendo costos.

Los sistemas automatizados constan de una unidad principal de procesamiento y control (generalmente los PLC´s), actuadores, sensores, etc., que en conjunto forman una línea de producción capaz de operar sin supervisión humana.

Al automatizar un proceso, siempre se busca reducir los costos invertidos en este, y en muchas ocasiones esto implica un mayor reto para el programador y supervisor del proyecto, ya que deben de ser capaces de utilizar los recursos que estén a su disposición para desarrollar un sistema optimo, funcional y aplicable, lo que puede traducirse como: menor equipo, mayor esfuerzo intelectual y administrativo.

La función principal de los sistemas de visión es reconocer y localizar objetos en el ambiente mediante el procesamiento de las imágenes [1]. En la industria son utilizados para inspeccionar piezas, mecanismos, procesos, etc., que necesitan gran precisión para garantizar la calidad de un producto o el correcto funcionamiento de la línea.

Al aplicar un sistema de visión, se busca generar un programa que dependiendo del procesamiento de imágenes, envíe señales a un PLC. Estas señales le indican al PLC el estado del proceso y la secuencia que debe seguir para el correcto funcionamiento de la línea de producción.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Actualmente existen procesos automáticos cuya calidad en el llenado y empaquetado de producto dependen del sistema de visión y resueltos por medio de thresholding y connectivity, tales como las productoras de refrescos, en las cuales se usan sistemas de inspección visual para la verificación del llenado del líquido, falta de etiquetas, mala impresión de etiquetas, falta de la tapa o deformaciones en las botellas [5]. Algunos ejemplos de estos son mecanismos pick & place ofrecidos por las empresas Trumark y Filmatic Systems.

El objetivo del desarrollo de este proyecto es ejemplificar un sistema de producción controlado por visión, el cual consta de un sistema automatizado de llenado y tapado, una interfaz de comunicación entre Matlab y un PLC, un programa capaz de determinar el estado del proceso utilizando el procesamiento de imágenes.

2. Descripción del Proceso Automatizado

El sistema (figura 1) consiste en el llenado y tapado de un envase, está formado por 1) dos bandas transportadoras, 2) tres cilindros neumáticos, 3) una bomba de agua, y 4) un disco rotatorio de posicionamiento para pasar de la etapa de llenado a la de tapado.

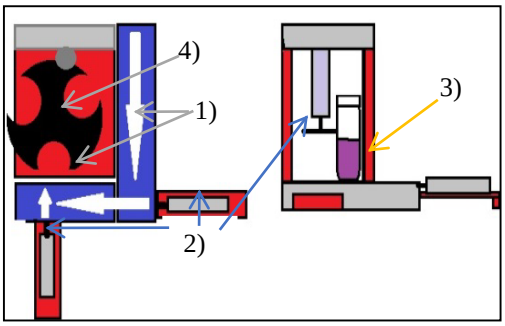


Figura 1. Diagrama físico del sistema.

2.1. Secuencia de funcionamiento.

La secuencia del proceso se puede describir por medio del diagrama espacio-fase mostrado en la figura 2.

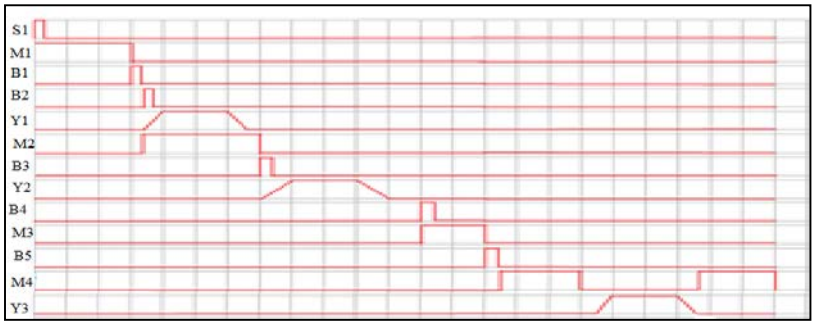


Figura 2. Diagrama espacio-fase del proceso.

Dónde:
S1 Accionamiento del botón de inicio.
M1: Accionamiento del motor de la banda 1.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

B1: Sensor de detección de un objeto en la primer área de interés.
B2: Sensor de inspección de características establecidas.
Y1: Accionamiento del cilindro 1.
M2: Accionamiento del motor de la banda 2.
B3: Sensor de detección del envase en la segunda área de interés.
Y2: Accionamiento del cilindro 2.
B4: Sensor de detección del envase en la tercer área de interés.
M3: Accionamiento del motor de la bomba de agua.
M4: Accionamiento del motor del disco rotatorio.
Y3: Accionamiento del cilindro 3.

Cabe aclarar que para nuestra aplicación B1, B2 y B3 son señales eléctricas que genera un microcontrolador en base a la detección del envase por medio del sistema de visión sobre la plataforma.

2.1.1. Recepción de envases en tiempo real.

El programa inicia capturando imágenes en un intervalo de 10 capturas por segundo. En el análisis de las imágenes obtenidas se busca en una región de interés (B1), un objeto que cumpla con un área de 9000 a 9100 pixeles para activar un actuador M1 enviando el contenedor a la siguiente etapa. En caso de no cumplir con dicha característica es desechado el envase (sensor de visión denotado como B2).

2.1.2 Inspección de posición para llenado en tiempo real.

Una vez aceptado, el contenedor llega al área donde es analizada una segunda región de interés (B3), buscando que el contenedor ya esté en posición para activar un actuador Y2 que desplaza el envase a un disco giratorio.

2.1.3 Etapa de Llenado

La cámara examina en la tercera región de interés que el envase ya esté en la posición correcta en el disco giratorio (B4), para que el actuador Y2 que lo desplazó regrese a su posición inicial y para proceder con el llenado a través de M3. Éste último proceso está controlado por un temporizador; cuando éste se desborda, se activa el motor M4 que gira el disco por un determinado tiempo dirigiendo el envase ya lleno a su sellado.

2.1.4 Etapa de Sellado

En la etapa de sellado se activa un actuador Y3 para ejercer presión hacia abajo y ser capaz de sellar de forma correcta el envase.

2.1.5 Etapa final del proceso

El disco (M4) que dirige el envase a las etapas gira de nuevo bajo temporizadores retirando el envase y posicionando el disco listo para recibir el siguiente contenedor.

El accionamiento de los actuadores descritos anteriormente en cada una de las etapas, se muestra en el diagrama espacio-fase de la figura 2.

2.2 Esquemas de Bloques.

Todo el proceso, desde la recepción del envase, análisis de dimensiones en base a área, traslado a la zona de llenado, etapa de sellado y salida del proceso se puede describir de manera visual a través de las figuras 3 y 4.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

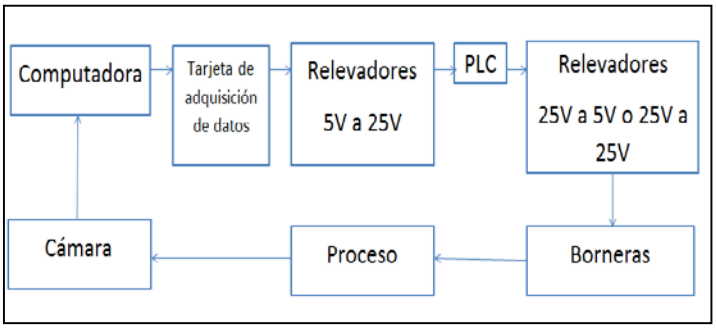


Figura 3. Diagrama de conexión

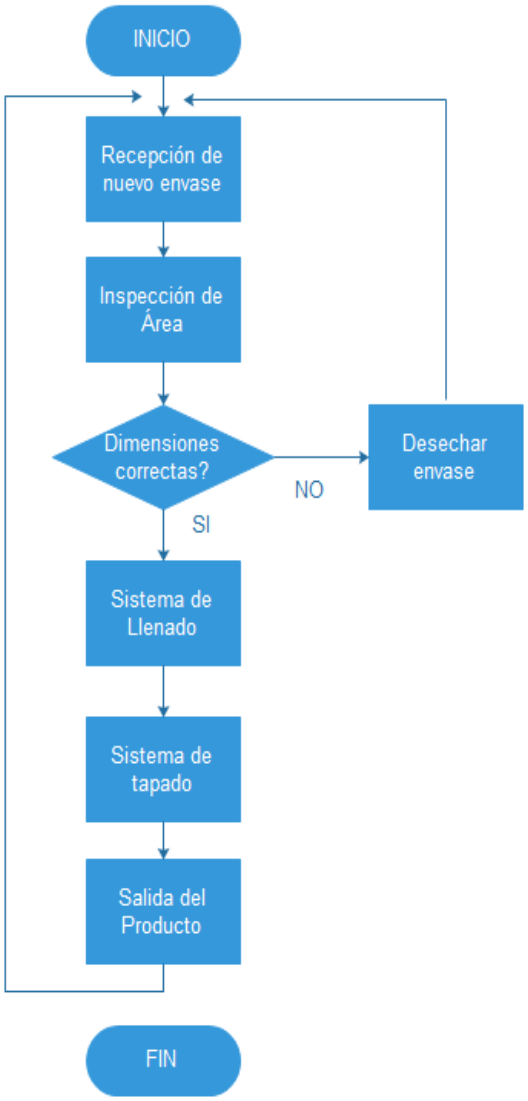


Figura 4. Secuencia de funcionamiento.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Se debe de mencionar que el microcontrolador no cumple ninguna función de control, su utilidad es únicamente enviar señales eléctricas de la computadora al PLC.

3. Descripción del sistema de visión.

El prototipo utiliza como único sensor una cámara web ubicada en la parte superior del sistema para tener un mayor rango de visión (figura 5).

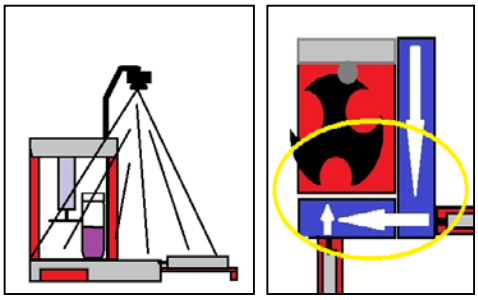


Figura 5. Rango de visión.

En el rango de visión se encuentra la banda 1, la banda dos, el área de llenado.

3.1. Segmentación por umbral

El filtrado por umbral es uno de los más importantes métodos de segmentación [3]. El objetivo es convertir una imagen en escala de grises a una nueva con sólo dos niveles, de manera que los objetos queden separados del fondo (figura 6).

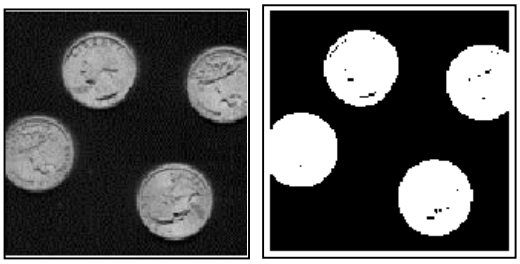


Figura 6. Umbralización de una imagen.

3.2. Procesamiento Morfológico

El procesamiento de erosión y dilatación elimina la información innecesaria dentro de la imagen, permitiendo reconocer patrones y formas de manera más detallada y rápida al unificar las regiones de mayor tamaño dentro de la imagen, que son las de nuestro interés y además elimina áreas menores que son principalmente ruido producidos por reflejos [4].

La erosión es una operación en la cual el resultado depende de la coincidencia de una figura de referencia con la imagen original, en la cual el resultado es 1 si hay coincidencia y 0 de lo contrario (figura 7).

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

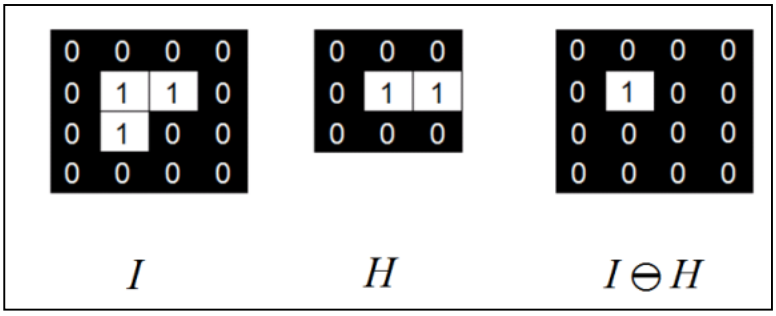


Figura 7. Operador de Erosión.

La dilatación es una operación en la cual se añaden pixeles a la estructura de una imagen (figura 8), donde su crecimiento es controlado por medio de una estructura de referencia [3].

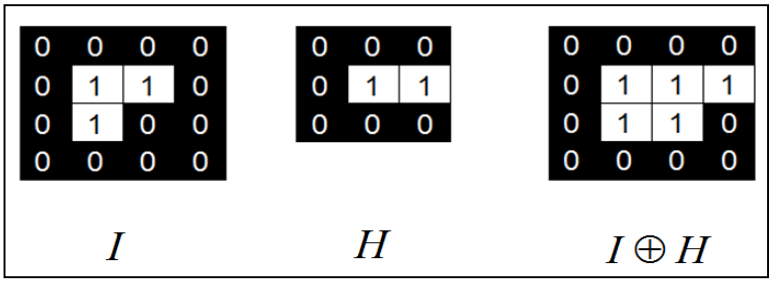


Figura 8. Operador de Dilatación.

El sistema de filtrado genera una imagen en blanco y negro, donde las áreas blancas son los objetos dentro de la imagen. Al tener un contraste de color, se puede extraer información de manera más rápida. El sistema busca la información de las áreas en pixeles de los objetos dentro de la imagen. Al coincidir con los datos preestablecidos se activa una señal de salida en microcontrolador que pasa por una etapa de potencia y posteriormente al PLC.

4. Sistema de Control por PLC

Las señales de entrada son principalmente condiciones dentro del PLC que determinan la ejecución de las líneas del programa.

En nuestro caso las señales de entrada provienen del sistema de control en Matlab, que utiliza un microntrolador como periférico enviando señales de 5 volts, posteriormente las señales pasan por una etapa de potencia compuesta por relevadores que controlan el flujo de una tensión de 24 volts para que el PLC detecte el cambio de bajo a alto.

Dentro de la programación del PLC se pueden encontrar funciones que permiten crear rutinas que responden a las señales de entrada (figura 9). Las señales provenientes de la computadora le indican al PLC en que parte del proceso se encuentra el envase y que rutina seguir para completar el ciclo del producto.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

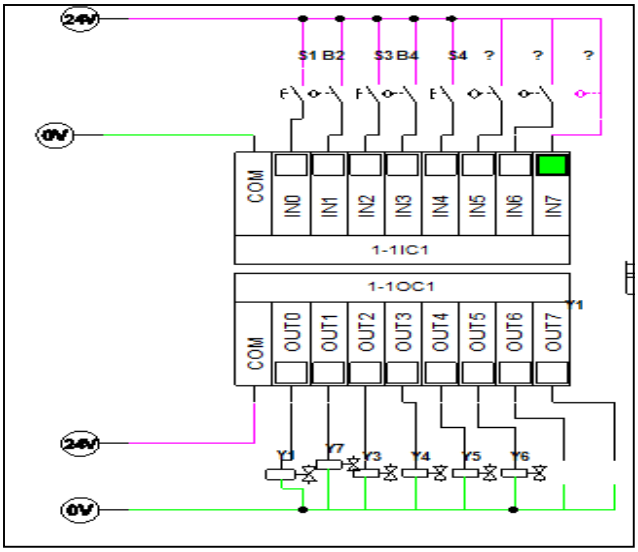


Figura 9. Plano de entradas y salidas digitales.

Las señales de entrada se utilizan para activar memorias de control, temporizadores y las salidas del PLC.

Las memorias de control son utilizadas para indicar que una señal ya fue recibida incluso si esta ya no está presente. Estas memorias permiten generar condiciones en la activación de las salidas y evitar accionamientos no deseados.

Los temporizadores permiten activar o desactivar una señal en determinado tiempo, luego de que se tiene la activación en la línea de código correspondiente. Su principal utilidad es tener el control del tiempo para la activación de un cilindro, motor y otros actuadores en general condicionando la activación de las salidas del PLC (figura 10).

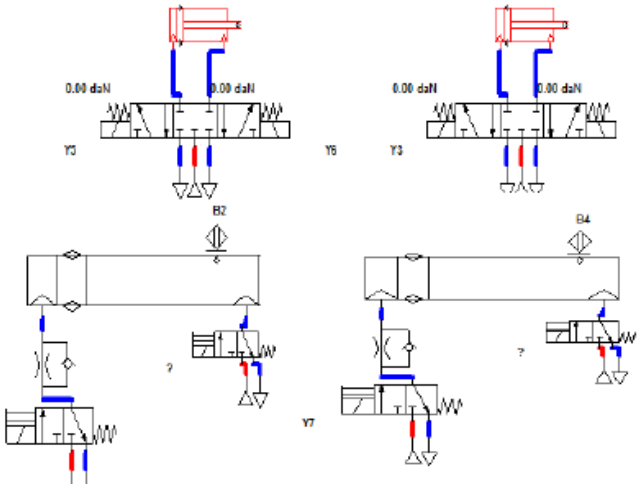


Figura 10. Esquema de actuadores del proceso.

Las salidas del PLC permiten tener el control del sistema. Estas señales de control pasan por una segunda etapa de potencia, donde el voltaje de salida controla el flujo de tensión de 5 volts y 24 volts utilizando relevadores, para activar los motores y las electroválvulas (encargadas del accionamiento los cilindros) respectivamente.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

4.1 Rutinas principales del PLC

El PLC controla el sistema siguiendo las rutinas programadas utilizando las señales provenientes del sistema de procesamiento de imágenes.

Las rutinas son:

a) Accionamiento del Botón de arranque. El sistema guarda este accionamiento en una memoria para condicionar al resto de las rutinas y que el proceso empiece al presionar el botón de arranque.
b) Accionamiento del botón de paro de emergencia. Este accionamiento impide la activación de las salidas, deteniendo el sistema en su estado actual, el sistema continua al ser accionado nuevamente el botón de arranque.
c) Accionamiento de las bandas. Las bandas son accionadas a partir de las señales provenientes de Matlab. En primer lugar se acciona la banda 1. Al ser detectado un envase en la primera área de análisis se detiene y se acciona la banda 2. Al ser detectado el envase en la segunda área de análisis se detiene la banda 2.
d) Accionamiento de los cilindros. El cilindro 1 es accionado para mover el envase de la banda q a la banda 2. El segundo cilindro es accionado para mover el envase de la banda 2 al disco giratorio. El cilindro 3 es accionado por un temporizador para sellar el envase con la tapa.
e) Accionamiento del disco giratorio. Al detectar el envase dentro del área del disco giratorio se activa un temporizador que acciona la bomba de agua durante 15 segundos, posteriormente un segundo temporizador evita que el disco gire durante 2 segundos para que escurra el agua residual en la manguera de llenado. Pasado estos dos segundos un tercer temporizador detiene el giro del disco para el accionamiento del tercer cilindro. Finalmente un cuarto temporizador activa el giro del disco para que la entrada quede disponible para el próximo envase.

5. Construcción física.

En la construcción física del proyecto se utiliza acrílico por ser un material resistente y fácil de manipular. El sistema debe de ser adaptable ante cualquier imprevisto. En las figuras 11, 12, 13, 14 y 15 muestran cada una de las partes que consta el proceso.

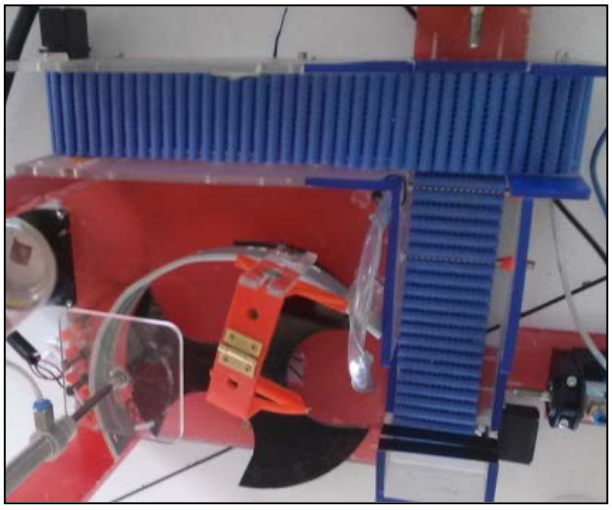


Figura 11. Bandas transportadoras.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

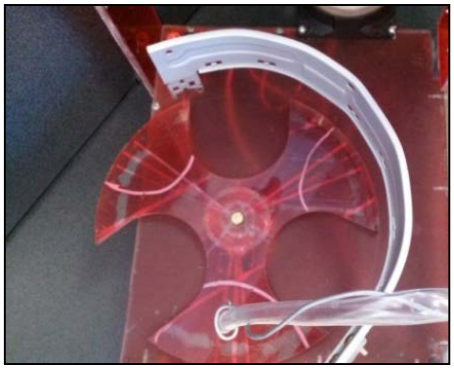


Figura 12. Disco rotatorio.

Figura 13. Contenedor y bomba de agua.

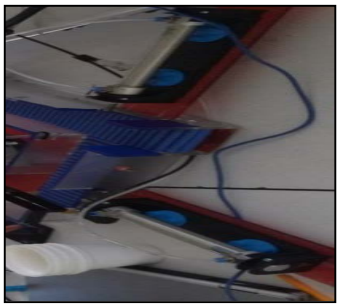


Figura 14. Cilindros Neumáticos.

Figura 15. Sistema de colocación de tapa.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Para el sistema de control se fabricó un gabinete que cuenta con 4 botones principales y borneras para la conexión entre el PLC y el sistema. En el interior del gabinete se encuentran una fuente de voltaje, los circuitos de potencia utilizados para alimentar con voltaje los componentes del proceso, el PLC y el microcontrolador que permite establecer la comunicación entre Matlab y el PLC (figura 16).

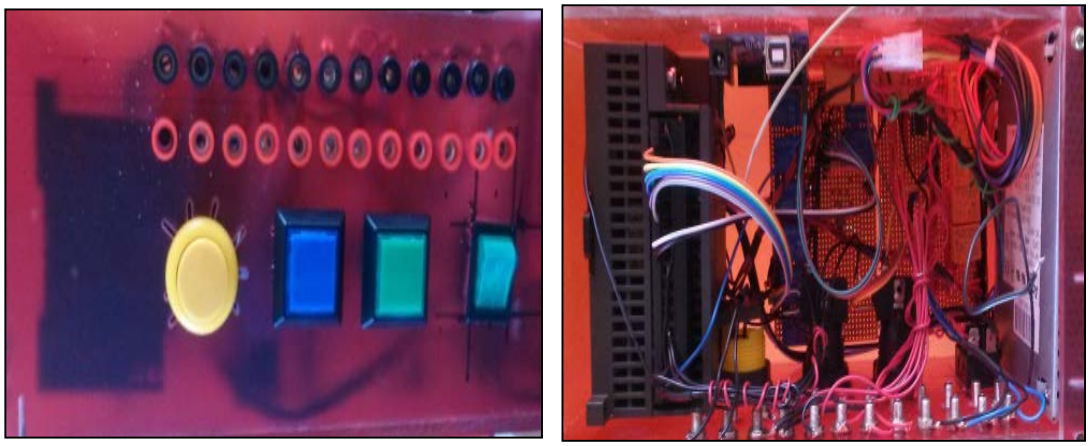


Figura 16. Gabinete de control eléctrico.

6. Análisis de Resultados

Se logró hacer un sistema automático utilizando sistemas de visión, que funciona de manera favorable, al que se le pueden añadir complementos para aumentar sus alcances.

La construcción física del proyecto requirió el uso de la inventiva general del equipo para determinar su morfología, las funciones que cumpliría y sus componentes mecánicos.

El software desarrollado cumple con su objetivo, pero es necesario seguir implementando características para mejorar su velocidad de procesamiento, determinar el área a inspeccionar de manera fácil e intuitiva.

En la figura 17 se muestra el proceso descrito anteriormente en ejecución y enfocando el área de llenado del envase.

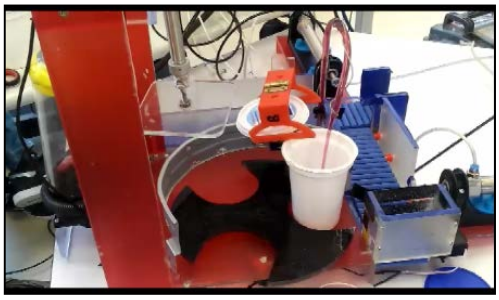


Figura 17. Proceso en funcionamiento.

En la figura 18 se muestra la interfaz de inspección realizada en Matlab y la cuál se encarga de proveer las señales eléctricas al PLC dependiendo de la posición y características del envase.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Figura 18 Interfaz de control Matlab.

En la figura 19 se muestra un segmento del código generado en lenguaje KOP para la automatización del proceso mediante PLC.

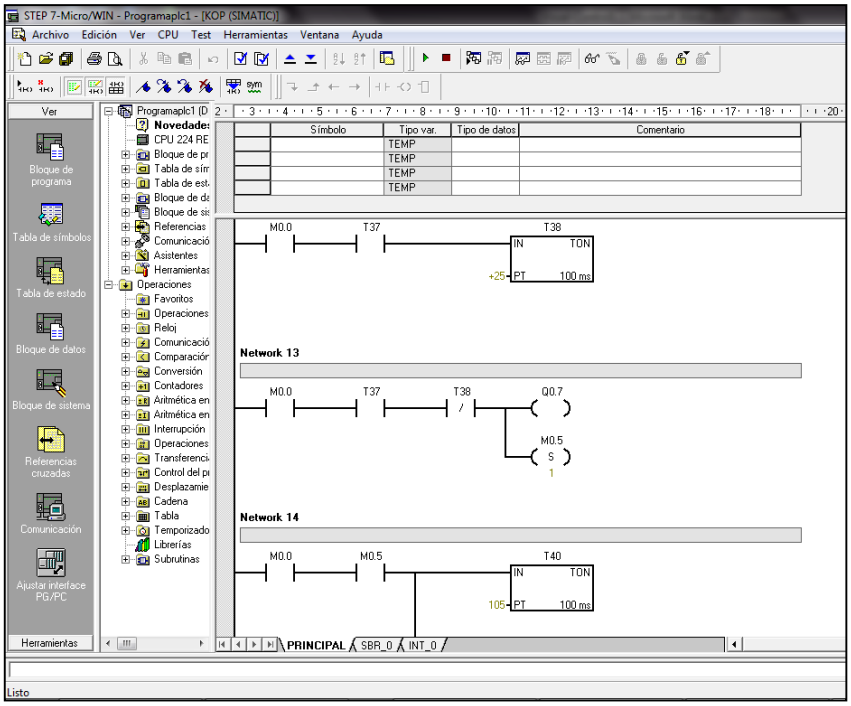


Figura 19 programa del PLC.

7. Conclusiones

El procesamiento de imágenes en tiempo real se ve afectado por la velocidad de procesamiento y el número de operaciones a realizar entre el intervalo de captura de la imagen. La iluminación es otro factor a considerar dentro del procesamiento. Estas complicaciones determinaron la complejidad del programa ya que fue necesario optimizar las funciones y procesos para agilizar la toma de decisiones y la respuesta general del programa.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

El uso de Matlab permite realizar diversas funciones complejas de manera óptima. Haciendo la combinación de estas funciones desarrollamos un sistema de control con una interfaz que permite visualizar el estado del proceso.

El uso de diferentes tecnologías supone un reto al tener que utilizar las respuestas de un sistema en otro completamente diferente.

Referencias

[1] Enrique Sucar L., Gómez G. *"Visión Computacional"*. Páginas: 185. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Puebla, México. 2010.
[2] Automación Micromecánica s.a.i.c, *"Controlador Lógico Programable (PLC)"*. Páginas: 84. Wilde, Buenos Aires. Argentina.
[3] Cuevas, E., Zaldívar, D., Pérez, M., *"Procesamiento Digital de Imágenes con MATLAB y Simulink."* México D.F., México. 2010.
[4] Obinata, G. and Dutta, A *"Vision Systems – Segmentation and Pattern Recognition."* I-TECH, Viena, Austria. 2007.
[5] Solomon, C., Breckon, T. "Fundamentals of Digital Image Processing – A Practical Approach with Examples in Matlab". WILEY-BLACKWELL. US. 2010.

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

27. Multi-Concentrador Térmico de Tubo Parabólico Controlado con Lógica Difusa

Ozuna Huerta Jesús Gustavo (1), Wozniak Marek (2), Gómez Palomares Jesús Leonel (1), Lugo Cóporo Marcos Raúl (1)

gozuna@industrial.uson.mx

Universidad de Sonora, México (1)
Politechnika Lodzka, Poland (2)

Resumen

***E**ste artículo describe el diseño y control de un multi-concentrador térmico de tubo parabólico, describiendo el diseño mecánico y el sistema de control basado en lógica difusa, para lograr el correcto posicionamiento y captar la mayor concentración de energía solar.*

Palabras clave: Lógica, difusa, multi-concentrador, solar.

1. Introducción

El siguiente articulo muestra cómo hacer un sistema de seguimiento solar de dos grados de libertad para posicionar un Multi-concentrador de tubo parabólico con respecto a la trayectoria aparente del sol dándole un movimiento cenital y azimutal utilizando un sistema de control difuso, que controlará dos motores de corriente directa como se muestra en la figura1.

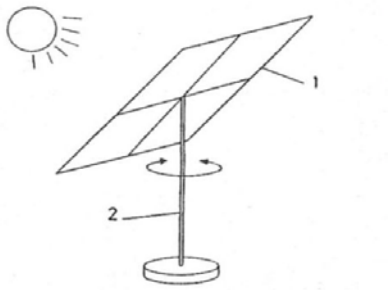


Figura 1. Seguimiento solar.

2. Problema

Los sistemas de concentración y generación de energía solar se han vuelto muy populares en nuestros días, por impulso de empresas y gobiernos a utilizar energías sustentables como alternativa económica para generar energía, el concentrador propuesto en este documento, busca ser una alternativa económica para generación de calor a pequeña escala basándose en la concentración de

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

calor por medio de un tubo parabólico conocido y ya probado actualmente por un sistema de menor tamaño y bajo costo en el sistema de control.

3. Prototipo

Se propone utilizar un sistema de tubos parabólicos conectados en serie para concentrar la mayor cantidad de energía térmica sobre una base[1], los cuales se moverán en conjunto, simulando un pequeño campo de concentradores parabólicos, a diferencia de los tubos parabólicos que se controlan por separado de manera individual. El prototipo de Multi-concentrador parabólico se muestra en la figura 2.

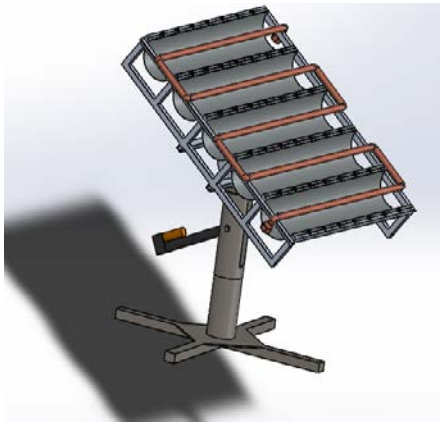


Figura 2. Multi-concentrador de tubo Parabólico

El sistema estará compuesto por cinco tubos parabólicos conectados en seria sobre una plataforma de grados de libertad, los cuales se moverán mediante dos motores de corriente directa y será controlado mediante un microcontrolador y un sistema de sensores ubicado en los cuatro puntos cartesianos de la estructura; los motores trabajaran de la siguiente forma:

Motor 1: Posición horizontal (norte-sur, sur-norte).
Motor 2: Posición vertical (este-oeste, oeste-este).

4. Control

Para la etapa de control se propuso un sistema basado en lógica difusa debido a que este emula el razonamiento humano y puede tomar decisiones basadas en datos inexactos [2]. El Multi-concentrador funcionara desde el amanecer al crepúsculo. Los rayos de sol se comportan con diferentes intensidades a lo largo del día, debido a que la luz del sol por la mañana es diferente que la de medio día, y los sensores no tendrían un valor lógico exacto. Para el control se usó un microcontrolador 16f628A el cual tiene cuatro entradas análogas donde se conectaran los sensores foto-resistivos, los cuales cambian su valor de resistencia dependiendo la cantidad de luz que incida en ellos, las reglas difusas están programadas y posicionaran el concentrador en los cuatro puntos cardinales.

Los componentes: sensores y actuadores se simularon en FuzzyTech, donde se utilizaron las siguientes ecuaciones (1) y (2), para modelar los motores de corriente directa.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

$$\frac{di}{dt} = \frac{Vapp}{L} - \frac{R}{L}i - \frac{K^{\Phi}}{L} \quad (1)$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{K^{\Phi}}{J} - \frac{b}{J}W \quad (2)$$

Donde Vapp es el voltaje de aplicación, R es la resistencia eléctrica, L es la inductancia, b es la fricción, J es el momento de inercia para el motor el cual cuenta con un campo electromagnético [3]. Para los sensores foto-resistivos se utilizó la siguiente ecuación, la cual es un divisor de voltaje que cuando el LDR está en la luz dará una tensión baja en la salida y una tensión alta cuando este a la sombra, el circuito dará una tensión de salida cuando se exponga a la luz solar de forma inversamente proporcional a la luz que reciba [4], la cual se puede observar en la siguiente ecuación (3):

$$Vout = \frac{LDR}{LDR+R1} \times Vcc \quad (3)$$

La configuración del circuito divisor de voltaje, resistencias y foto-resistencia se muestra en la figura 4.

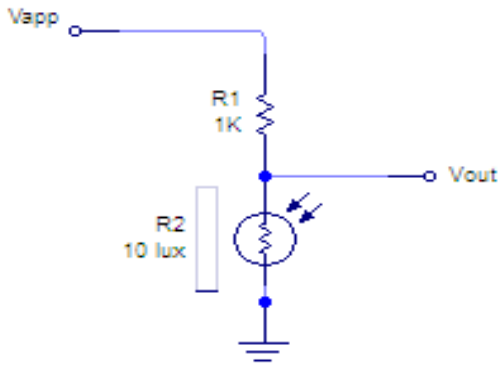


Figura 4. Divisor de voltaje

La señal análoga de los sensores S1-S2 y S3-S4 se ordenó de la siguiente manera tal como se muestra en la siguiente tabla 1:

Tabla 1. Sensores.

Entradas		**Salidas**	
S1	Este	M1A	Motor 1 A
S2	Oeste	M1R	Motor 1 R
S3	Norte	M2A	Motor 2 A
S4	Sur	M2R	Motor 2 R
St	S térmico	Ev	E. Válvula

La señal análoga de los sensores se envía al microcontrolador [5], para que este decida cuál es la estrategia adecuada a seguir, y controlar la dirección que tomaran los motores 1 y 2.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

En la figura 5 se puede observar la representación de los valores análogos de las LDRs con respecto a la iluminación.

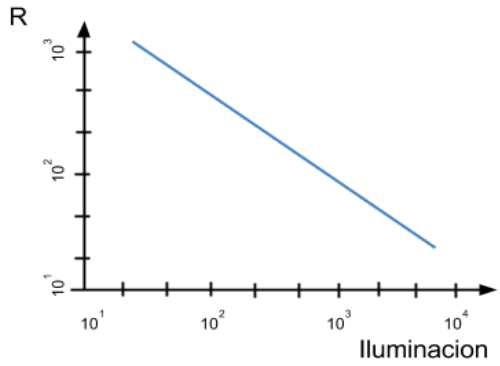


Figura 5. Resistencia respecto a iluminación.

Las señales de entrada provenientes de las LDR son de 10 bits que van desde 0 a 1023 para lograr una mayor resolución de lectura; en la figura 6 y 7 se muestra el conjunto de entrada difusa del sistema.

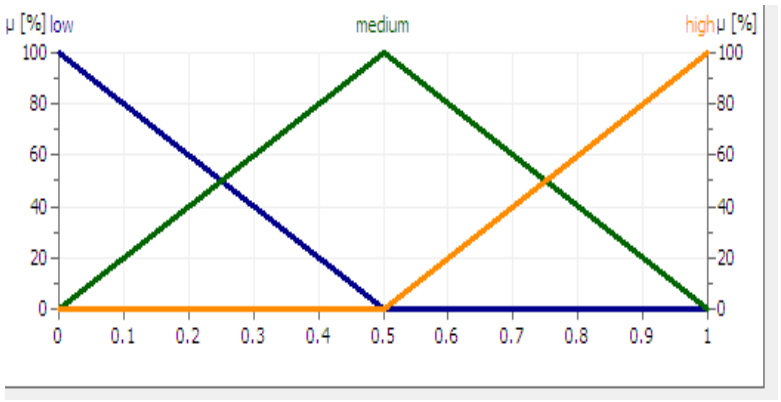


Figura 6. Conjunto difuso de entrada Sensor-Oeste.

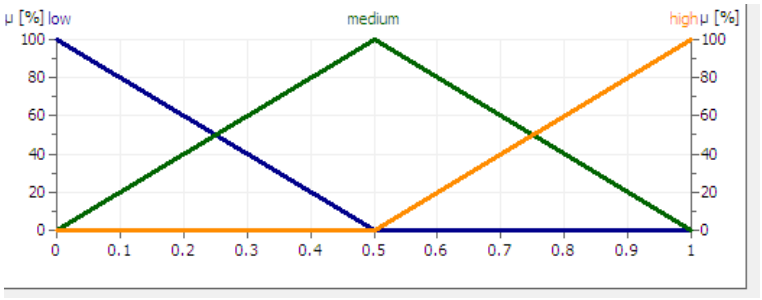


Figura 7. Conjunto difuso de entrada Sensor-Este.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

El conjunto discreto de salida mostrado en la figura 8 es similar para los dos motores debido a que ambos comparten las mismas propiedades eléctricas y mecánicas.

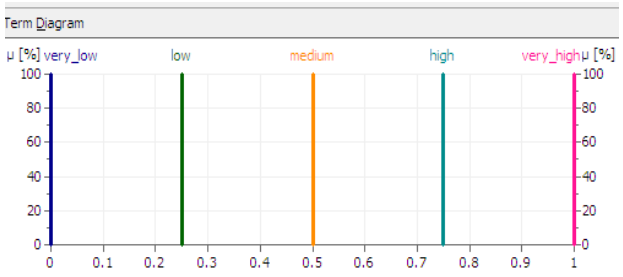
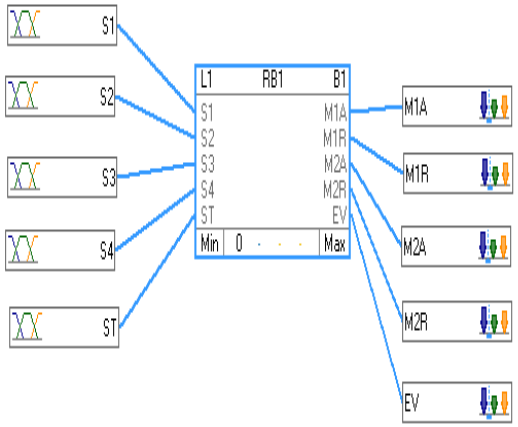


Figura 8. Conjunto de salida para el controlador difuso del motor EO. (M1A, M1R).

El esquema del sistema de control difuso para el conjunto de entradas, salidas, además el bloque de reglas para el correcto posicionamiento del concentrador, se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Bloque de reglas



5. Simulación

El sistema se simuló en Fuzzytech, en el cual se obtuvieron los siguientes resultados: por ejemplo, la interacción dada entre los sensores este y oeste con la salida del motor EO (este-oeste), donde la respuesta del motor con respecto a la señal de los sensores fue satisfactoria esta se muestra en la figura 9.

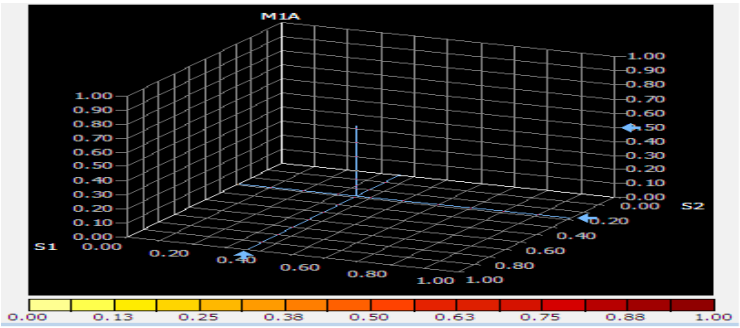


Figura 9. Gráfico de salida de los sensores Este y Oeste (S1, S2), con respecto a la salida Motor EO

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Así como la interacción entre el sensor térmico con respecto a la salida Electroválvula, esta se muestra en la figura 10, esta deja pasar el flujo de agua del concentrador cuando esta llega a la temperatura deseada.

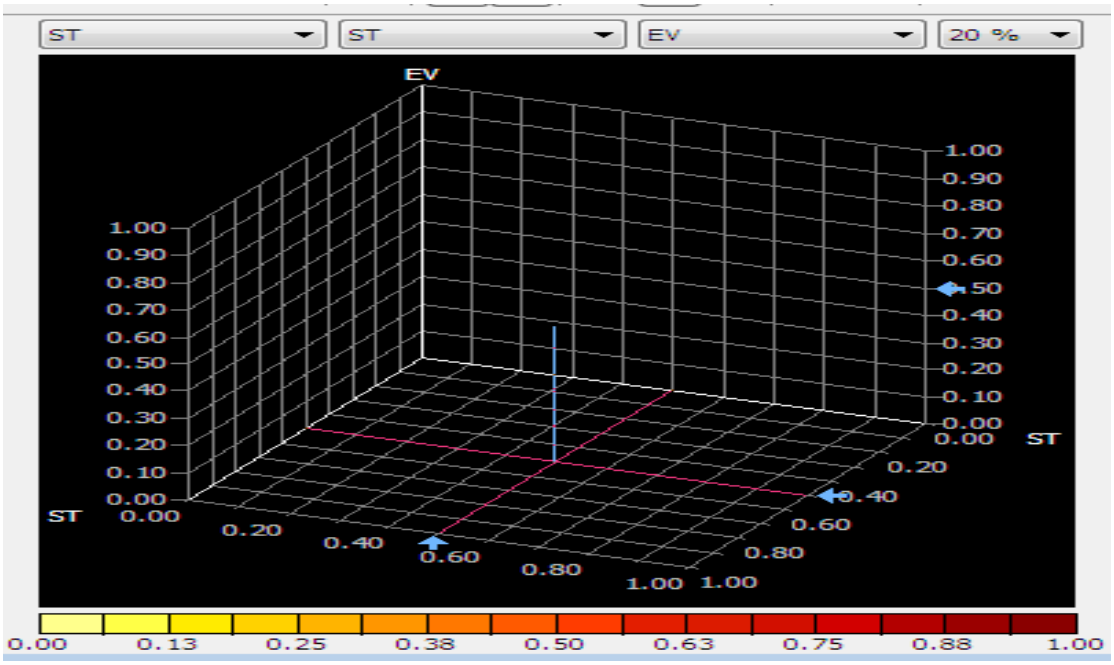


Figura 10. Gráfico de salida del sensor térmico con respecto a la salida electroválvula

6. Conclusiones y Recomendaciones

Se busca que éste sistema sea utilizado como una alternativa económica para el seguimiento solar destinado a la concentración y generación de energía térmica mediante el uso de un microcontrolador con respecto a los existentes que unan sistemas de posicionamiento global GPS. Al simular el sistema en Fuzzytech se facilita la predicción de las respuestas del sistema, pero no es hasta que se realice el circuito y se descargue el sistema de control difuso a un microcontrolador cuando podrá observarse la respuesta real.

Referencias

[1] González J. "*Energías Renovables*", Reverte S.A, España, 1era edición, 2009.
[2] Del Brío M., Molina S. "*Redes neuronales y Sistemas Borrosos*", Alfaomega, México, 3ra edición, 2007.
[3] Bolton W. "*Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica*", Alfaomega, México, 4ta edición, 2010.
[4] Boylestad R. "*Electrónica: Teoría de Circuitos*", Pearson, México ,8va edición, 2008.

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

28. Control de Posición Hiperbólico de Robots Manipuladores

Ortiz Ortiz Tania J.[1], Ramos Arroyo Oscar[2], Cid Monjaraz Jaime[3], Limón Díaz Miguel A[4], Reyes Cortés Fernando[5]

[1] División de Tecnologías de Automatización e Información UTEQ, Mexico *tania.ortiz@uteq.edu.mx,*
[2] Facultad de Ciencias de la Electrónica BUAP, *oscar_racso2@hotmail.com,*
[3] DITCo-CUVyTT-BUAP, jaime.cid@correo.buap.mx,
[4] Facultad de Ingeniería UASLP, *miangellim1@gmail.com*
[5] Facultad de Ciencias de la Electrónica BUAP, *fernando.reyes@correo.buap.mx*

Resumen

En este artículo se aborda el problema de control de posición global para robots manipuladores. Se presenta una estructura para un regulador del tipo proporcional derivativo más compensación de gravedad, que asegure la estabilidad asintótica global del sistema de control en lazo cerrado para la dinámica no lineal del robot de acuerdo con el método directo de Lyapunov y el principio de invariancia de LaSalle, se presentan resultados experimentales en tiempo real con un robot de transmisión directa de 3 gdl.

La principal contribución de este trabajo es demostrar que el controlador propuesto con estructuras hiperbólicas logra el posicionamiento del robot, es decir tiene un punto de equilibrio con propiedades de estabilidad en forma asintótica global.

Palabras Clave: Robot, Transmisión Directa, Estabilidad de Lyapunov, Control PD con compensación de gravedad.

1. Introducción

Los procesos automáticos requieren más Robots Industriales que realicen con exactitud actividades de traslado, pintado y estibado de objetos, soldadura por arco, corte de materiales, etcétera; para lograr esto se necesitan estructuras de control confiables que regulen sus movimientos con la mayor precisión y repetibilidad posible.

El estudio del control de posición y de movimiento de los Robots Manipuladores requiere del conocimiento del modelo de su dinámica así como las propiedades matemáticas que de ésta derivan. El problema de control de posición (también llamada regulación) es uno de los temas más relevantes en
robótica. El objetivo principal es el posicionamiento del efector final dentro de su espacio de trabajo en la posición deseada no importando la posición inicial del brazo manipulador.

Una estrategia sencilla de regulación de posición es el PD, el cual era el algoritmo más ampliamente utilizado estudiado por Takegaki y Arimoto [1]; mientras tanto, Arimoto y Miyazaki [2] producen un sistema de control de lazo cerrado con estabilidad asintótica global para una selección trivial de ganancias proporcional y derivativa [2], a modo de contraste, el simple control PID es otra estrategia popular, sin embargo, su estructura matemática carece de estabilidad asintótica global [3-5].

En los últimos años, varios esquemas de control de tipo PD han sido desarrollados para la regulación de posición de los robots manipuladores, entre los que podemos citar: una clase de PID y Controladores PD para la posición en [3-5]; un controlador PD con ganancias proporcional y derivativa como funciones no lineales de los estados del robot propuesto en [6]; la metodología mediante el moldeo de energía donde se proponen diferentes esquemas de regulación global en [7-8]; funciones de Lyapunov de energía artificial que cumplen con la teoría de estabilidad para diseño de esquemas de control en [9-13]; un algoritmo de control con lógica difusa en [14]; y una metodología basada en la norma L_1 para la implementación de un controlador adaptativo como se presenta en [15].

En vista de la simplicidad y la aplicabilidad de regulaciones PD en aplicaciones industriales con un alto rendimiento, la principal motivación de este trabajo es proponer un nuevo esquema que conduce a la estabilidad asintótica global empleando funciones de energía artificial que cumplan con las propiedades matemáticas expuestas por el método directo de Lyapunov y el teorema de invarianza de Lasalle del sistema en lazo cerrado formado por la dinámica no lineal de robots de n grados de libertad y la estructura de control. La nueva familia tiene una estructura no lineal, que incorpora funciones hiperbólicas que logran conducir rápidamente al error de posición al punto de equilibrio, el control propuesto cae en la categoría de control a nivel de las articulaciones y requiere que la posición deseada sea en el espacio articular del manipulador.

Este documento presenta los experimentos en tiempo real para dicho control con un manipulador de tres grados de libertad con transmisiones directas en sus articulaciones. Los resultados experimentales consisten de una comparación de los errores de posición obtenidos de las cuatro familias resultantes de las funciones hiperbólicas propuestas. Este artículo está organizado de la siguiente forma: en la Sección 2 se expone el modelo matemático de la dinámica del robot manipulador y algunas propiedades útiles para el estudio de la estabilidad del punto de operación; en la Sección 3 se presentan los algoritmos para la propuesta de control y el análisis de la estabilidad asintótica global; en la Sección 4 se describe el montaje experimental basado en el robot de accionamiento directo; la sección 5 muestra la comparación experimental entre el esquema propuesto para las diferentes familias de funciones hiperbólicas y finalmente, algunas conclusiones son expuestas en la Sección 6.

2. Dinámica del Robot Manipulador

El modelo dinámico de un robot serial de eslabones considerados como cuerpos rígidos de n grados de libertad [16-17] se puede representar con vectores y matrices (1); matriz de Coriolis (2); par gravitacional (3):

$$M(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{f_f}(\dot{\boldsymbol{q}},\boldsymbol{f}) + g(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{\tau} \quad (1)$$

$$C(q,\dot{q})\dot{q} = M(q)\dot{q} - \frac{\partial}{\partial q}\left[\frac{1}{2}\dot{q}^T M(q)\dot{q}\right] \quad (2)$$

$$g(\boldsymbol{q}) = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{q}} U(\boldsymbol{q}) = \nabla_q U(\boldsymbol{q}) \quad (3)$$

donde:

$\boldsymbol{q} \in R^n$	Vector de posiciones articulares.
$\dot{\boldsymbol{q}} \in R^n$	Vector de velocidades articulares.
$\ddot{\boldsymbol{q}} \in R^n$	Vector de aceleraciones articulares.
$\boldsymbol{\tau} \in R^n$	Vector de pares de entrada.
$C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} \in R^n$	Vector de Coriolis y fuerzas Centrípetas.
$M(\boldsymbol{q}) \in R^{nxn}$	Matriz de inercia definida simétrica y positiva.
$g(\boldsymbol{q}) \in R^n$	Vector de pares gravitacionales.
$\boldsymbol{f_f}(\dot{\boldsymbol{q}},\boldsymbol{f}) \in R^n$	Vector de pares de fricción, que incluye la fricción Viscosa, de Coulomb y Estática.

El vector de fricción de las articulaciones produce energía disipativa para velocidades diferentes de cero, dichos efectos se observan dentro de los cuadrantes primero y tercero dentro de la respuesta lineal y de saturación de los servomotores; para el caso de velocidades nulas solo el efecto de la fricción estática estará presente. El fenómeno de fricción tiene el efecto físico de oponerse al movimiento del robot y disipa energía convirtiéndola de mecánica a térmica, se consideran los modelos tradicionales de fricción de Coulomb y Viscosa, modelándolos como una combinación lineal con la estática. Se asume que el tipo de unión entre los eslabones es de tipo rotatorio, obteniéndose una estructura matemática compleja (1).

Las matrices de fuerzas centrípetas y de coriolis: $C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})$ y la matrix de inercia derivada con respeto al tiempo $M(\dot{\boldsymbol{q}})$ satisface del [16-17]:

$$\dot{\boldsymbol{q}}\left[\tfrac{1}{2}M(\dot{\boldsymbol{q}})-C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\right]\dot{\boldsymbol{q}}^T=0\ \forall\ \boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}\ \in R^n$$

La matriz de inercia $\in R^{nxn}$ es una matriz simétrica $M(\boldsymbol{q})^T=M(\boldsymbol{q})$, definida positiva $M(\boldsymbol{q})>0$, por lo que existe su matriz inversa $M(\boldsymbol{q})^{-1}\in R^{nxn}$ siendo simétrica también $M(\boldsymbol{q})^{-1}=M(\boldsymbol{q})^{-1^T}$ y definida positiva $M(\boldsymbol{q})^{-1}>0$.

Para la matriz de coriolis tenemos:

$C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\in R^{nxn}$ no es una matriz única pero el vector $C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}}$ sí lo es. Cuando el vector de velocidades articulares es cero la matriz de coriolis satisface $C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})_{q=0}=C(\boldsymbol{q},0)=0\ \in R^{nxn}$ para todo $\boldsymbol{q}\ \in R^n$, [16-17]. Gracias a la propiedad de antisimetría que facilita el estudio de estabilidad, la derivada temporal de la matriz de inercia y de fuerzas centrípetas y de coriolis se tiene[16-17]: $\dot{M}(\boldsymbol{q})=C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})+C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})^T$.

3. Regulador de posición PD con funciones Hiperbólicas

El proceso de regulación implica inyección de energía en las diversas articulaciones o servomecanismos de acuerdo a una ley de control **τ** de tal forma que la posición actual del robot $\boldsymbol{q}(t)\in R^n$ y la velocidad angular $\dot{\boldsymbol{q}}(t)\in R^n$ de movimiento tiendan asintóticamente al punto de equilibrio que es la posición deseada:

$$\lim_{t\to\infty}\begin{bmatrix}\boldsymbol{q}(t)\\ \dot{\boldsymbol{q}}(t)\end{bmatrix}\rightarrow\mathbf{0} \tag{4}$$

Para cerrar el lazo se propuso trabajar con un controlador tipo proporcional-derivativo. De acuerdo a la técnica de moldeo de energía [18] se establece una gran cantidad de familias de algoritmos de control capaces de proporcional la energía de diseño necesaria para ser inyectada a los eslabones de un robot de n-grados de libertad, como pares y puedan alcanzar la posición deseada.

La ley de control de moldeo de energía [18] utilizada es la siguiente:

$$\boldsymbol{\tau}=\nabla U_a\left(K_p,\tilde{\boldsymbol{q}}\right)-\boldsymbol{f}_v(K_v,\dot{\boldsymbol{q}})+\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) \tag{5}$$

Donde:

- $\nabla U_a\left(K_p,\tilde{\boldsymbol{q}}\right)$ es el gradiente de la energía potencial.
- La función $U_a\left(K_p,\tilde{\boldsymbol{q}}\right)$ se conoce como energía potencial artificial debido a que es la energía de diseño.
- $\boldsymbol{f}_v(K_v,\dot{\boldsymbol{q}})$ es la función de inyección de amortiguamiento o freno mecánico.
- $\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q})$ representa la compensación del par de gravedad.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

La ley de control propuesta que utiliza la estructura matemática de acuerdo a la siguiente ecuación es:

$$\boldsymbol{\tau} = K_p\left(\frac{cosh^{m-1}(\tilde{\boldsymbol{q}})*sinh(\tilde{\boldsymbol{q}})}{1+cosh^{m}(\tilde{\boldsymbol{q}})}\right) - K_v\text{atan}(\dot{\boldsymbol{q}}) + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) \tag{6}$$

Donde:

$\nabla U_a\left(K_p, \tilde{\boldsymbol{q}}\right) = K_p\left(\frac{cosh^{m-1}(\tilde{\boldsymbol{q}})*sinh(\tilde{\boldsymbol{q}})}{1+cosh^{m}(\tilde{\boldsymbol{q}})}\right)$
y $\boldsymbol{f}_v(K_v, \dot{\boldsymbol{q}}) = K_v\text{atan}(\dot{\boldsymbol{q}})$ quedan de la siguiente expresados en vectores columna:

$$\frac{cosh^{m-1}(\tilde{\boldsymbol{q}}) * sinh(\tilde{\boldsymbol{q}})}{1+cosh^{m}(\tilde{\boldsymbol{q}})} = \begin{bmatrix} \frac{cosh^{m-1}(\tilde{q}_1) * \sinh(\tilde{q}_1)}{1+cosh^{m}(\tilde{q}_1)} \\ \vdots \\ \frac{cosh^{m-1}(\tilde{q}_n) * \sinh(\tilde{q}_n)}{1+cosh^{m}(\tilde{q}_n)} \end{bmatrix}$$

$$\text{atan}(\dot{\boldsymbol{q}}) = \begin{bmatrix} \text{atan}(\dot{q}_1) \\ \vdots \\ \text{atan}(\dot{q}_n) \end{bmatrix}$$

Con:

$\boldsymbol{Kp} \in R^{nxn}$	Matriz diagonal de constantes definida positiva
$\boldsymbol{Kv} \in R^{nxn}$	Matriz diagonal de constantes definida positiva
$m \in N$	Vector de aceleraciones articulares
$\tilde{\boldsymbol{q}} \in R^n$	Vector Error de posición
$\boldsymbol{q_d} \in R^n$	Vector de posiciones deseadas
$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) \in \boldsymbol{R^n}$	Vector de pares gravitacionales

La expresión matemática (7) representa la ecuación de lazo cerrado que combina el modelo dinámico no lineal del brazo manipulador con la estructura de control, observe que sólo se expresa la fricción viscosa:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\tilde{\boldsymbol{q}} \\ \dot{\boldsymbol{q}}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{\boldsymbol{q}} \\ M(\boldsymbol{q})^{-1}\left[\boldsymbol{kp} * \frac{cosh^{m-1}(\tilde{\boldsymbol{q}})*sinh(\tilde{\boldsymbol{q}})}{1+cosh^{m}(\tilde{\boldsymbol{q}})}\right] - \boldsymbol{kv} * \boldsymbol{atan}(\dot{\boldsymbol{q}}) - C(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} - \boldsymbol{B}\dot{\boldsymbol{q}} \end{bmatrix} \tag{7}$$

Para el primer elemento de la ecuación (7) cuando se alcanza la posición deseada se tiene $\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{0}$. Para el segundo elemento de la ecuación (7), la matriz de inercia $M(\boldsymbol{q})$ es una matriz definida positiva, y su matriz inversa $M(\boldsymbol{q})^{-1}$ existe y es definida positiva. La matriz de fricción viscosa B es una matriz definida positiva. Para la matriz de fuerzas centrípetas y de Coriolis $C(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) = \boldsymbol{0} \in R^{nxn}$ puesto que $\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{0} \in R^n$.

Por diseño las matrices $\boldsymbol{K_p}$ y $\boldsymbol{K_v}$, ganancias proporcionales y derivativas respectivamente, son matrices diagonales, luego la función $\boldsymbol{f}_v(K_v, \dot{\boldsymbol{q}}) = 0 \Leftrightarrow \dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{0}$. Por otro lado:

$\boldsymbol{kp} * \frac{cosh^{m-1}(\tilde{\boldsymbol{q}})*sinh(\tilde{\boldsymbol{q}})}{1+cosh^{m}(\tilde{\boldsymbol{q}})}$=0 $\Leftrightarrow \dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{0}$, por lo tanto el punto de equilibrio existe y es único. Por otra parte para la demostración de estabilidad se tiene que la función de Lyapunov propuesta está constituida por la cinética del robot más el gradiente de la energía potencial (8):

$$V(\dot{\boldsymbol{q}}, \tilde{\boldsymbol{q}}) = \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{q}}^T M(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}} + \sqrt{\ln\left(\frac{1+cosh^{m}(\tilde{\boldsymbol{q}})}{2}\right)}^T \boldsymbol{kp}\sqrt{\ln\left(\frac{1+cosh(\tilde{\boldsymbol{q}})}{2}\right)} \tag{8}$$

De forma desglosada la función de Lyapunov queda:

$$V(\dot{\boldsymbol{q}},\tilde{\boldsymbol{q}}) = \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{q}}^T M(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}} + \begin{bmatrix} \sqrt{\ln\left(\frac{1+cosh^m(\widetilde{q_1})}{2}\right)} \\ \vdots \\ \sqrt{\ln\left(\frac{1+cosh^m(\widetilde{q_n})}{2}\right)} \end{bmatrix}^T \boldsymbol{kp} \begin{bmatrix} \sqrt{\ln\left(\frac{1+cosh^m(\widetilde{q_1})}{2}\right)} \\ \vdots \\ \sqrt{\ln\left(\frac{1+cosh^m(\widetilde{q_n})}{2}\right)} \end{bmatrix}$$

Siendo la derivada temporal de la función de Lyaponuv (9):

$$\dot{V}(\dot{\boldsymbol{q}},\tilde{\boldsymbol{q}}) = \dot{\boldsymbol{q}}^T M(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{q}}^T \dot{M}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}} - \boldsymbol{kp}\frac{cosh^{m-1}(\tilde{\boldsymbol{q}})*sinh(\tilde{\boldsymbol{q}})}{1+cosh^m(\tilde{\boldsymbol{q}})} \quad (9)$$

Sustituyendo la ecuación de lazo cerrado y simplificando se obtiene la ecuación (10):

$$\dot{V}(\dot{\boldsymbol{q}},\tilde{\boldsymbol{q}}) = \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{q}}^T \dot{M}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}} - \dot{\boldsymbol{q}}^T C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} - \dot{\boldsymbol{q}}^T B\dot{\boldsymbol{q}} - \dot{\boldsymbol{q}}^T \boldsymbol{kv} * \boldsymbol{atan}(\dot{\boldsymbol{q}}) \quad (10)$$

Sabiendo que la propiedad de antisimetría:

$\frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{q}}^T\left[\dot{M}(\boldsymbol{q}) - 2C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\right]\dot{\boldsymbol{q}} = \mathbf{0}$ del modelo dinámico, por lo tanto el desarrollo queda como (11):

$$\dot{V}(\dot{\boldsymbol{q}},\tilde{\boldsymbol{q}}) = -\dot{\boldsymbol{q}}^T B\dot{\boldsymbol{q}} - \dot{\boldsymbol{q}}^T \boldsymbol{kv} * \boldsymbol{atan}(\dot{\boldsymbol{q}}) \ll 0 \quad (11)$$

Mediante el teorema de invarianza de LaSalle:

$$\Omega = \left\{ \begin{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{q}} \\ \dot{\boldsymbol{q}} \end{bmatrix} \in R^{2n}, \dot{V}(\dot{\boldsymbol{q}},\tilde{\boldsymbol{q}}) = 0 \Leftrightarrow \begin{matrix} \tilde{\boldsymbol{q}} = 0 \\ \dot{\boldsymbol{q}} = 0 \end{matrix} \right\}$$

Se demuestra estabilidad asintótica, además al probarse la unicidad del punto de equilibrio $V(\mathbf{0},\mathbf{0}) = 0$; y la derivada temporal $\dot{V}(\dot{\boldsymbol{q}},\tilde{\boldsymbol{q}}) \ll 0$, como una función definida negativa, se concluye que la función de energía propuesta es una función candidata en el sentido de Lypunov, que permitirá para cada punto de posición deseada generar un ente atractor que permita una estabilidad asintótica global del punto de equilibrio.

4. Plataforma experimental

Las pruebas de la ley de control propuesta fueron ejecutadas en una plataforma experimental de un robot antropomórfico de tres grados de libertad, el cual cuenta con una arquitectura abierta diseñada para realizar investigaciones de diversa índole.

La plataforma experimental de nombre Rotradi (figura 1), fue diseñada y construida por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), dicho robot está constituido por tres motores de transmisión directa cuyas características pueden obsérvese en la Tabla 1, con espacio de trabajo de 1 m.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Figura 1: Robot de tres grados de libertad, Rotradi.

Tabla 1: Características de los servomecanismos actuadores del robot manipulador experimental.

Articulación	Modelo del servomotor	Torque Máximo	Resolución
Base	DM-1015B	15 Nm	4,096,000
Hombro	DM-1050A	50 Nm	4,096,000
Codo	DM-1004C	4 Nm	4,096,000

Los servomotores son operados en modo par, por lo que éstos actúan como una fuente del mismo recibiendo como señal analógica de referencia una tensión eléctrica. Para le electrónica de instrumentación es utilizada una tarjeta de control de movimiento modelo MFIO3A de marca Precision Microdynamics Company Inc., la cual es instalada en una PC con un procesador Pentium IV, se tienen también: las basadas en arquitectura FPGA que son empleadas para la lectura de los pulsos proporcionados por los encoders incrementales, 3 de convertidores D/A de 12 bits, la de los puertos I/O, 3 para timers programables para fijar el periodo de muestreo a 2.5 mseg.

El algoritmo fue programado en lenguaje C de forma estruturada con el software Borland C++ versión 3.1 instalado en un sistema operativo sistema operativo MSDOS versión 6, el cual garantiza la ejecución del algoritmo de control en tiempo real.

Se ha establecido que la articulación con nombre Base corresponde a q_1, así mismo, la articulación de nombre Hombro corresponde a q_2, mientras que la articulación Codo se estableció a la coordenada articular q_3.

El algoritmo de control propuesto requiere del conocimiento a priori de la compensación de gravedad, el cual está dado por:

$$g(\boldsymbol{q}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 14.28\,sin(q_2) + 1.14sin(q_2 + q_3) \\ 1.14sin(q_2 + q_3) \end{bmatrix}$$

5. Resultados Experimentales

Las posiciones deseadas para cada grado de libertad fueron: $\mathrm{q}_1 = 45°$, $\mathrm{q}_2 = 45°$ y $\mathrm{q}_3 = 90°$, las cuales fueron alcanzadas por cada eslabón independientemente. En las siguientes Tablas 3.1 y 3.2 se describen a que articulación corresponde la variable graficada:

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Tabla 3.1: Trazos para los errores articulares.

Gráficas de errores de posición articular		
Trazo Azul	Base	$\tilde{q}_1$
Trazo Verde	Hombro	$\tilde{q}_2$
Trazo Rojo	Codo	$\tilde{q}_3$

Tabla 3.2: Trazos para los pares aplicados.

Gráficas de pares aplicados a las articulaciones		
Trazo Azul	Base	τ_1
Trazo Verde	Hombro	τ_2
Trazo Rojo	Codo	τ_3

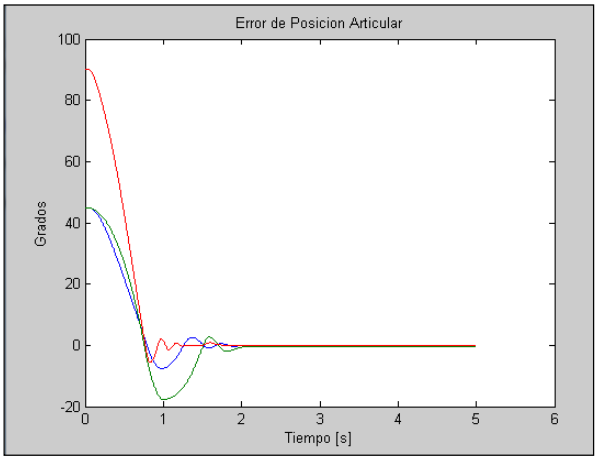


Figura 2. Errores de posición: Base, Hombro y Codo

Los parámetros de diseño que fueron empleados en la figura 2 fueron los siguientes: m=1, kp1=kp2=25, kp3=3, kv1=0.1 kp1, kv2=0.6 kp2, kv3=0.1 kp3.

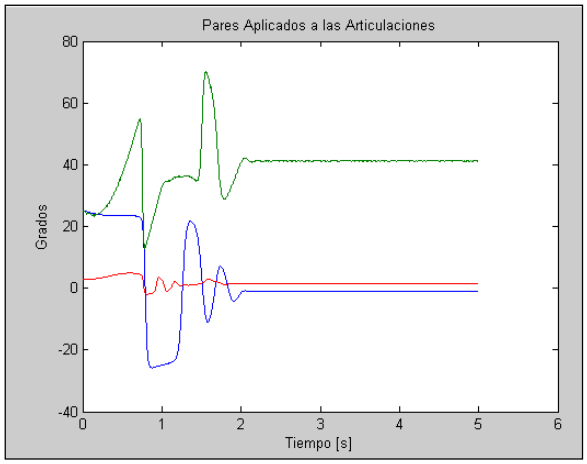


Figura 3: Pares Aplicados: Base, Hombro y Codo.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

m=1, kp1=kp2=25, kp3=3, kv1=0.1 kp1, kv2=0.6 kp2, kv3=0.1 kp3.

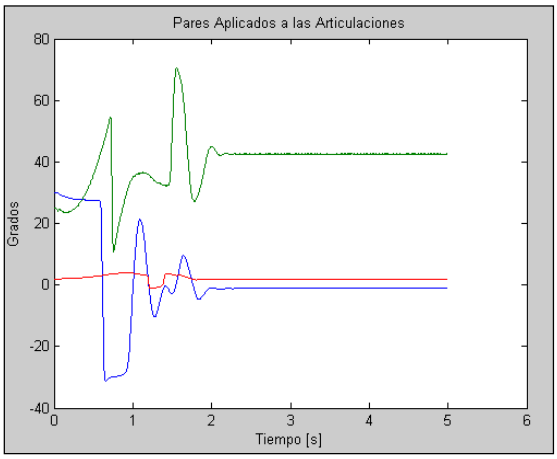


Figura 4: Pares Aplicados: Base, Hombro y Codo.

Siendo los parámetros de diseño de la figura 3.1 los que a continuación se enlistan: m=2, kp1=30, kp2=25, kp3=2, kv1=0.1 kp1, kv2=0.6 kp2, kv3=0.1 kp3.

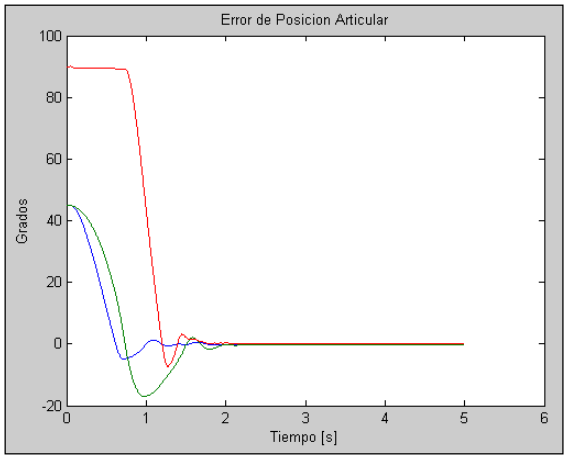


Figura 5: Errores de posición: Base, Hombro y Codo.

Mientras que la figura 4 se utilizaron los siguientes parámetros del algoritmo de control: m=2, kp1=30, kp2=25, kp3=2, kv1=0.1 kp1, kv2=0.6 kp2, kv3=0.1 kp3.

Las gráficas de los errores de posición que se muestran en la figuras 2 y 5 corresponden a los exponentes m=1 y m=2, respectivamente; se observa el trazo de la dinámica del movimiento de los eslabones al alcanzar las distintas posiciones deseadas. Cuando t=2 segundos todas las articulaciones han alcanzado de forma exitosa el valor de referencia, pudiéndose observar en las gráficas errores finales en el estado estable de valor nulo, satisfaciendo la condición de estabilidad denotada por (11). De acuerdo a la condición de estabilidad: un punto de equilibrio funciona como una región de atracción de las variables de estado (error de posición y velocidad articular), donde la potencia dinámica de la función de Lyapunov reduce la variación del suministro de energía de forma progresiva y asintótica a cero dentro de las variables de estado, lográndose el objetivo del control denotada por (4).

Mientras que en las figuras 3 y 4, se observan los trazos de los pares aplicados a cada grado de libertad obtenidos, los cuales son suministrados a los servomotores de acuerdo a la ley de control. El

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

par suministrado en un tiempo inicial tiene una amplitud con valores positivos y negativos para el caso de la articulación denominada base q_1 en los cuatro casos y solo para q_2 (hombro) en el caso cuando m vale 1. Conforme el tiempo evoluciona las articulaciones llegan a la posición deseada, los errores de posición se vuelven negativos cuando existen desvíos de la posición de referencia.

6. Conclusiones

Se ha presentado una nueva estrategia de control de posición (regulación de robots manipuladores) compuesta de funciones hierbólicas con demostración formal de estabilidad asintótica gloabl del punto de equilibrio de la ecuación en lazo cerrado que forma el modelo dinámico del robot con el algoritmo propuesto.

La regulación de posición PD con funciones hiperbólicas y con compensación de gravedad es una estrategia confiable que proporciona respuestas satisfactorias pues cumple con el objetivo de control de regulación errores nulos y velocidades nulas. Los eslabones se mueven a las posiciones deseadas como fue presentado en los resultados experimentales. Mediante la utilización de familias de funciones hiperbólicas asegura la no saturación de los servomotores. Los resultados sugieren que se alcanzan las posiciones deseadas para los tres eslabones aproximadamente en 2 segundos, por lo que el controlador propuesto con la función candidata en el sentido de Lyapunov trabajan de forma óptima.

Referencias

[1] M. Takegaki and S. Arimoto, *A new feedback method for dynamic control of manipulator*, ASME J. Dynamics Syst. Measurement and Control, Vol.103, 1981, pp. 119-125.
[2] A. S. Miyazakif, *Stability and robustness of PD feedback control with gravity compensation for robot manipulator, in Robotics*: Theory and Application DSC, Vol.3. Edited by F. Paul, 1986.
[3] R. Kelly, *Global Positioning of Robot Manipulators via PD Control Plus a Class of Nonlinear Integral Actions*, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 43, No. 7, 1998,
pp. 934-938.
[4] R. Kelly, *A tuning procedure for stable PID control of robot manipulators*, Robotica Cambridge University Press, Vol. 13, 1995, pp. 141-148.
[5] J. Alvarez,V. Santibañez and R. Campa, *Stability of Robot Manipulators Under Saturated PID Compensation*, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 16, No. 6, 2008, pp. 1333-1341.
[6] Y. Xu, J. M. Hollerback and D. Ma, *A nonlinear PD controller for force and contact transient control*, IEEE Control Systems, Vol. 15, No. 1, 1993, 15-21.
[7] R. Kelly and V. Santibañez, *Global Regulation of Elastic Joint Robots Based on Energy Shaping, Transactions on Automatic Control*, Vol. 43, No. 10,
1998, pp. 1451-1456.
[8] V. Santibañez, R. Kelly and F. Reyes*, A New Set-Point Controller with Bounded Torques for Robot Manipulators*, IEEE Transactions on Industrial electronics, Vol. 45, No. 1, 1998, pp. 126-133.
[9] F. Azenc, M. Malisoff, *Strict Lyapunov Function Constructions Under LaSalle Conditions With an Application to Lotka-Volterra Systems*, IEEE Trans on Automatic Control, Vol. 55, April 2010, p.841.
[10] F. Mazenc and S. Bowong, *Tracking Trajectories of Feedforward Systems*, IEEE Transactions on Autumatic Control, Vol. 47, No. 8, 2002, pp.1338-1342.
[11] K. Takahashi, M. Sasaki, *Remarks on tip angular position control of single-link flexible robot arm using modified Lyapunov function*, International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), August 2010, p.1024.
[12] J. Kasac, B. Novakovic, D. Majetic and D. Brezak, *Global Positioning of Robot Manipulators With Mixed Revolute and Prismatic Joints*, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 51,No.6, 2006, pp. 1035-1040.
13] C. Xie and Y. Lin, *A stability theorem and applications in control designs*, 8th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA), June 2010, p.1758.

[14] V. Santibañez, R. Kelly and M. Llama, *A novel global asymptotic stable set-point fuzzy controller with bounded torques for robot manipulators*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 13, No. 3, 2005, pp. 362-372.
[15] H. Sun,N. Hovakimyan and B. Tamer. *L1 Adaptive controller for uncertainnonlinear multi-input multioutput systems withinput quantization*, IEEE Transactions onAutomatic Control, Vol. 57. No. 3, March 2012, pp. 565-578.
[16] M. W. Spongand M. Vidyasagar*. Robot Dynamics and Control*, John Wiley and Sons, NY, 1989.
[17] L. Sciavicco and B. Siciliano, *Modeling and Control of Robot Manipulators*, Springer-Verlag, London, 2005.
[18] Cortés F. R. (2011). *Robótica, Control de Robots Manipuladores*, Alfaomega Grupo Editor, Primera Edición, México.

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

29. Técnicas aplicadas de realidad virtual y realidad aumentada para el fomento de la biodiversidad de áreas naturales protegidas de Querétaro

Pérez López Luis Alberto, Flores Muñoz Carlos, Tovar Arriaga Saúl, Sánchez Ramos Marco Antonio, Ayala Martínez Irving Jesús, Sagaz Olvera Marco Antonio

saulotov@yahoo.com.mx

Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Informática

Resumen

En este artículo se aborda el uso de técnicas de realidad virtual y realidad aumentada en la elaboración de sistemas de software de interacción para concientización de la sociedad sobre la importancia de la conservación de la biodiversidad en áreas naturales protegidas de Querétaro. Se elaboró un paseo virtual de zonas ecológicas en el cual se puede interactuar a través de movimientos corporales y gafas especiales para lograr una gran sensación de inmersión. Así mismo, se realizó una aplicación de realidad aumentada para Tablet con la cual se pueden mostrar e interactuar con objetos tridimensionales animados.

Palabras clave: Realidad Virtual, Realidad Aumentada, Educación Interactiva

1. Introducción

Uno de los objetivos principales del desarrollo sustentable es satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones del futuro. Para cumplir dicho objetivo es primordial que las generaciones actuales conserven la biodiversidad. Desgraciadamente, la degradación de vastas zonas con una gran diversidad de flora y fauna se presenta mucho en los países en vías de desarrollo como México.

Existen diversas iniciativas para controlar la pérdida de amplias zonas naturales, siendo la educación una de las más importantes y con más áreas de oportunidad en nuestra sociedad. Mediante la educación es posible concientizar a las generaciones presentes y futuras del impacto que esto podría tener en nuestras vidas. Una de las áreas naturales del Estado de Querétaro es el área protegida de “El Batán”, cuya reserva de la biósfera posee una gran biodiversidad, y por lo tanto representa una zona de interés.

El grupo de trabajo que desarrolla este proyecto es interdisciplinario y está formado por una colaboración de investigadores y alumnos de las Facultades de Informática y Ciencias Naturales de la Universidad Autónoma de Querétaro.

El constante avance en las tecnologías de información ha derivado en la aparición de técnicas computacionales que hacen la educación más amigable y sencilla. Este tipo de técnicas hacen uso de más sentidos a la vez. Por ejemplo, se pueden visualizar en pantallas animaciones cada vez más complejas y de alta calidad e interactuar con estas utilizando dispositivos hápticos. Un claro ejemplo de estos sistemas son los videojuegos, los cuales se ha demostrado pueden ser una herramienta poderosa

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

de educación [1]. Dentro de estas herramientas se encuentran la Realidad Aumentada (RA), la Realidad Virtual (RV) y más recientemente las Interfaces Tangibles de Usuario conocidas como TUIs [2].

El objetivo de este proyecto es utilizar técnicas de RV y RA para implementar sistemas de educación innovadores para concientizar a la sociedad acerca de la importancia de conservar la biodiversidad existente en las áreas naturales de Querétaro.

2. Materiales y Métodos

Para la elaboración de este proyecto, se han desarrollado algunas ideas para el aprendizaje utilizando RV con gráficas de alta calidad en la creación ambientes virtuales de ciertas áreas naturales protegidas. Estos entornos virtuales contienen plantas típicas de la zona, diversas especies de insectos, así como vistas de 360° tomadas con cámaras panorámicas de alta resolución. La forma de desplazarse a través del entorno es mediante un sensor Kinect comúnmente utilizado para videojuegos. De esta manera, el usuario puede dar órdenes por medio de movimientos corporales o gestos.

Así mismo, se ha desarrollado una aplicación de RA para tabletas y smartphones la cual tiene una serie de controles para la visualización de objetos tridimensionales animados.

2.1 Paseo virtual por el área natural de El Batán

Realidad virtual: Realidad virtual es una ciencia basada en el empleo de computadoras y otros dispositivos cuyo fin es producir entornos visuales, sonoros y táctiles que permita al usuario tener la sensación de estar presente en ella [3]. Para lograr una mejor inmersión se debe contar con gafas sofisticadas que permitan al usuario tener un campo de visión más amplio y con baja latencia de modo que la animación parezca más realista. Aparte del entorno visual, que es probablemente el más importante, la experiencia se puede mejorar utilizando otros sentidos como el oído, por medio de sonido tridimensional, o el tacto, por medio de sensores hápticos.

Kinect: Este dispositivo permite a los usuarios controlar e interactuar mediante una interfaz natural de usuario (NUI) que reconoce gestos, comandos de voz, objetos e imágenes. El Kinect tiene un sensor de distancia que está conformado por un proyector de luz infrarroja, el cual manda haz de luces con un patrón constante sobre los objetos frente al dispositivo (Figura 1a), y una cámara infrarroja con la cual se captura una imagen de dichos puntos. Esta imagen es comparada con un patrón de referencia previamente obtenido con una pantalla frente al dispositivo. Dependiendo del desplazamiento de los puntos sobre los objetos en relación a los puntos de la imagen de referencia es como se puede localizar la distancia de cada uno de ellos [4]. De esta manera se obtiene una nube de puntos los cuales en conjunto dan forma a los objetos. Estos datos son enviados a la computadora donde se procesan con un algoritmo que determina la posición de las articulaciones del usuario [5, 6], Figura 1b. Este algoritmo infiere la distribución de las partes del cuerpo en relación a una base de datos obtenida de personas con diferentes características. Para esto se utilizan bosques de árboles de decisiones donde cada hoja contiene una descripción de un usuario distinto [7].

2.1.1 Implementación del software

El sistema de software fue desarrollado en Unity (Unity Technologies, San Francisco, EUA) el cual es un motor de videojuegos multiplataforma. Contiene un potente motor gráfico con herramientas intuitivas y flujos de trabajo para crear contenido 3D interactivo. El programa base está hecho en C#.

Modelos 3D: En este proyecto se han utilizado modelos 3D que cumplen con las condiciones necesarias de calidad y procesamiento que actualmente demanda el motor de videojuegos utilizado en el proyecto. Dichos modelos fueron elaborados por un diseñador gráfico egresado de la Licenciatura en Artes Visuales de la Facultad de Bellas Artes, utilizando software de código abierto como Blender, Gimp y Krita; para la creación del modelado poligonal, escultura digital y una fase inicial de texturizado se

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

empleó Blender; para los acabados finales de la textura y mapas especiales de relieve, se utilizaron las herramientas de pintura y manipulación fotográfica que Gimp y Krita proporcionan. De esta manera se logró obtener un buen flujo de trabajo para la producción de los modelos que fueron presentados. En la Figura 3b se muestra un ejemplo de un modelo 3D, en este caso un garambullo.

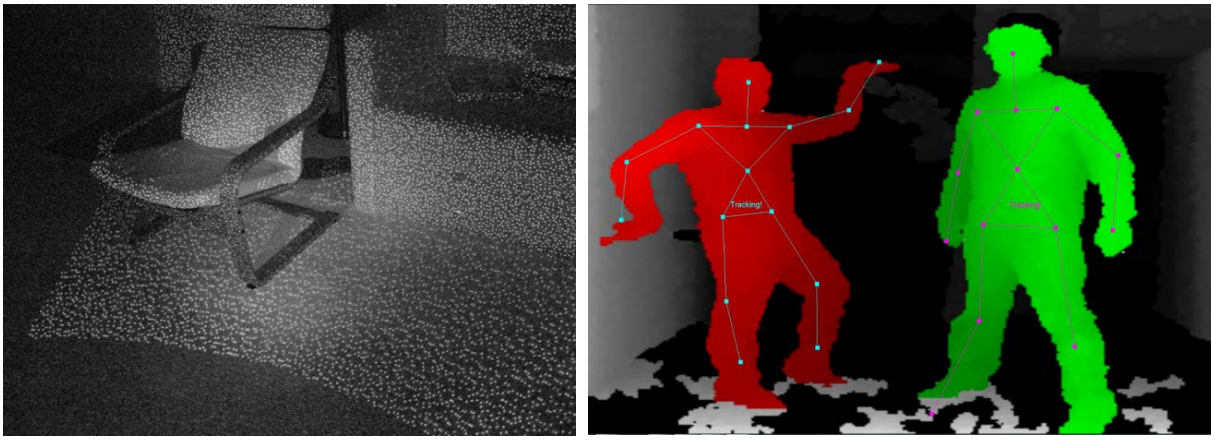


Figura 1. a) Patrón constante de haz de luces infrarrojas, b) Detección de articulaciones del cuerpo.

Movimientos: Para mover el ambiente virtual se hizo un análisis de los movimientos más intuitivos de manipulación. Para a avanzar, los usuarios inconscientemente optan por utilizar los pies. De esta forma, la marcha comienza cuando el usuario levanta los pies alternadamente de manera continua. Si el usuario desea virar hacia la derecha este debe rotar el tórax con dirección a la que desea girar el ambiente. Para entender de manera simple se muestra el diagrama de flujo de la Figura 2.

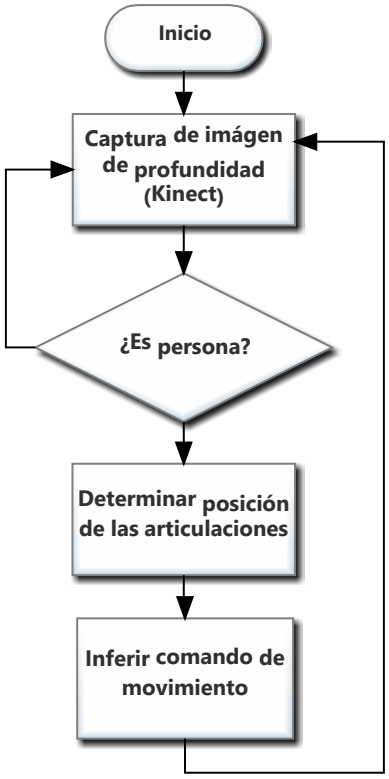


Figura 2. Diagrama de flujo simplificado de la toma de movimientos.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

En la Figura 3a se observa en la pantalla un avatar el cual sigue los movimientos que el usuario ha realizado con sus extremidades. Cuando este avatar toca algunos de los objetos tridimensionales dentro del ambiente virtual se despliega información científica útil, Figura 3b.

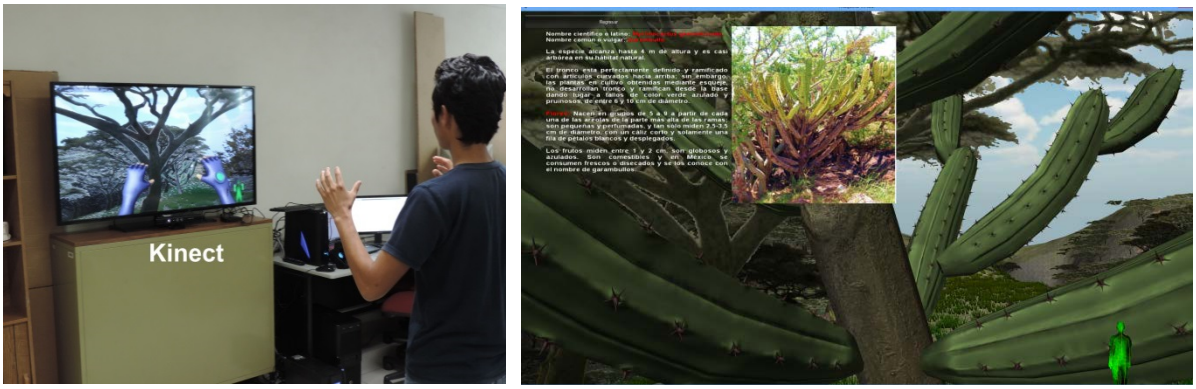


Figura 3. a) Control del sistema de RV por medio de gestos b) Modelo 3D de un garambullo con ficha técnica desplegada

Inmersión total: En la Figura 4a, se puede ver las gafas de realidad virtual Oculus Rift (Oculus VR, Irvine, California, EUA) contienen una visión mucho más realista, lo que mejora la inmersión en el sistema haciendo que la experiencia sea aún más profunda, Figura 4b.

Figura 4. a) Gafa de RV Oculus Rift, b) Vista del usuario usando las gafas.

En el escenario virtual se agregaron puntos de interacción, representados como esferas metálicas flotantes que al ser activadas muestran una fotografía panorámica esférica de 360°, que fue obtenida a partir de fotografías reales desde el sitio donde se ubica el punto de interacción.

Figura 5. a) Esfera metálica flotante para acceder a la vista panorámica, b) Vista panorámica de una región protegida del Estado de Querétaro (El Batán).

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

2.2 Aplicación de RA para tableta

Realidad aumentada: Cuando se habla de Realidad Aumentada (RA) es en referencia a la visión directa o indirecta del entorno físico de nuestro mundo real, donde los elementos del ambiente se combinan estrechamente con elementos virtuales y ambos en conjunto crean una realidad mixta en tiempo real. Este tipo de realidad mixta se forma gracias al trabajo en conjunto de varios dispositivos electrónicos que añaden la información virtual a la información física del entorno.

La aplicación se hizo para tabletas con sistema operativo Android. Se determinó trabajar sobre este sistema operativo por las facilidades de uso. Para su realización también se utilizó Unity, motor de videojuegos multiplataforma, y Vuforia, que es el sistema de desarrollo (SDK) de realidad aumentada de Qualcomm. De esta manera, se formó un potente conjunto de herramientas que permiten desarrollar desde simples visualizadores hasta las más sofisticadas aplicaciones interactivas de realidad aumentada.

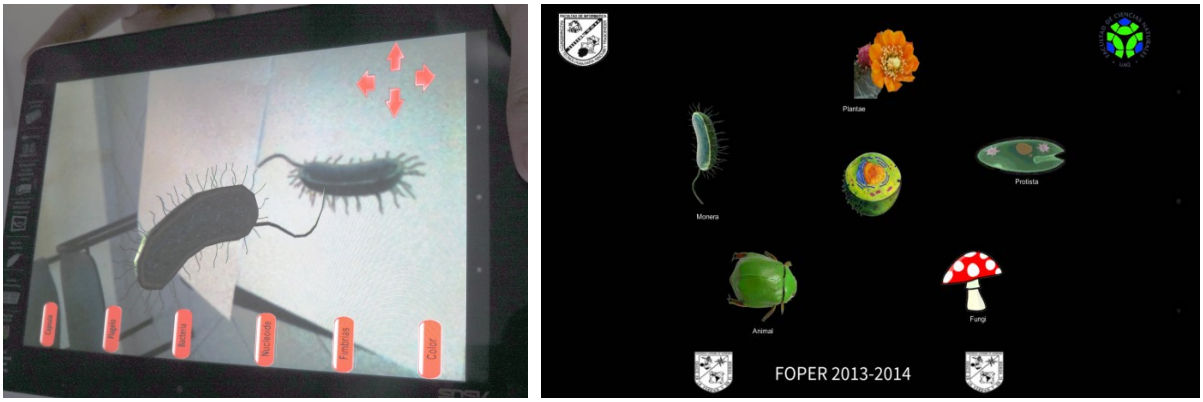


Figura 5. a) Tableta con la aplicación de realidad aumentada, b) Menú principal de la aplicación.

En la Figura 7a se muestra el modelo de un escarabajo diseñado en Blender. Se pueden activar algunas acciones con los botones que se muestran en la interfaz. Estas acciones pueden ser el despliegue o retracción de las alas del insecto, una animación de aleteo o una animación en donde este se mueve a lo largo de la pantalla. Otro modelo es el de un hongo, Figura 7b. Así mismo, el usuario puede ver distintas capas y elementos que conforman el hongo.

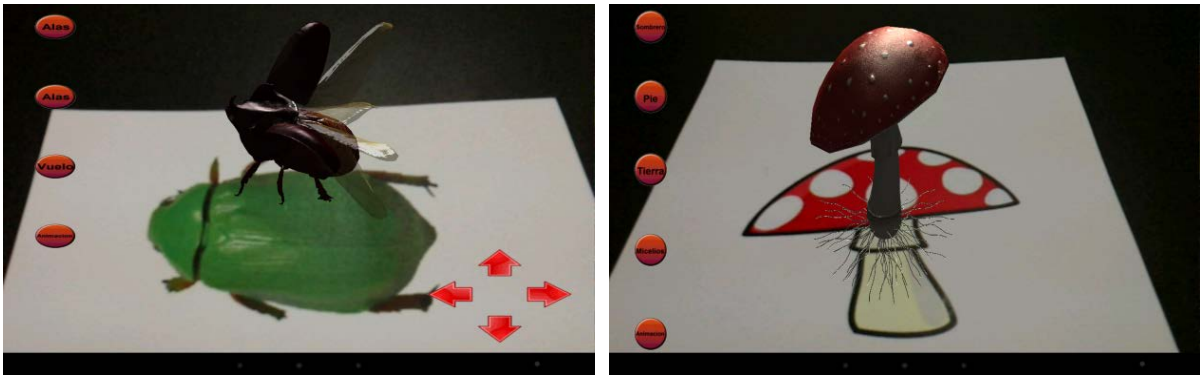


Figura 7. Muestra de la aplicación de realidad aumentada. a) Escarabajo y b) hongo que se encuentran en la región.

En todos los casos, las animaciones se seleccionan a través de botones. Por ejemplo, en el caso de una bacteria, se hicieron menús interactivos que hacen que aparezca o desaparezca el flagelo, la estructura que conforma el nucleoide, las fimbrias, la cápsula, o se puede hacer una animación de rotación de la bacteria completa para poder ser observada desde diversos puntos de vista. Así mismo se desarrollaron más animaciones de un hongo (Amanita m.), células (bacteria y paramecio), y otras plantas.

3. Resultados

Los prototipos pudieron ser mostrados en varias preparatorias del estado de Querétaro. La presentación del proyecto estuvo financiado por el Gobierno del Estado de Querétaro. Entre las exposiciones que se hicieron del trabajo están las siguientes:

- 27º Exposición de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro (EXPOCYTEQ 2013)
- 20ª Semana Nacional de Ciencia y Tecnología
- Plantel COBAQ Buenavista del Municipio de Huimilpan
- Plantel COBAQ 3 del Municipio de Corregidora
- Plantel COBAQ 14 del Municipio de San Joaquín
- Participación en el coloquio dirigido por el cuerpo académico ALGOR de la Facultad de Informática de la Universidad Autónoma de Querétaro.

4. Conclusiones

Cabe resaltar que la manera divertida y llamativa de las aplicaciones desarrolladas hace que el conocimiento sea más accesible a los usuarios. Estas tecnologías tienen un potencial muy alto, ya que en el futuro varios de los elementos de hardware que se utilizan van a ser muy comunes.

Como trabajo futuro se pretende incrementar el número de modelos de plantas y animales así como de tomas panorámicas de áreas naturales protegidas para la inclusión de más regiones de interés, buscando la manera de cubrir lo más posible en cuanto a la biodiversidad. Una vez terminado, se tiene planeado subir el software como opción gratuita a Xbox Live (Sitio Web de Microsoft) para que los usuarios de esta consola puedan utilizar el software y aprender un poco de la región de manera divertida. Así mismo, falta agregar órdenes por voz, ya que esto abriría la posibilidad de hacer más acciones y mostrar información pertinente. Otra forma de manejar sistema sin utilizar el Kinect podría ser con un dispositivo Leap Motion (Leap Motion Inc., San Francisco, California, EUA), el cual es capaz de localizar la punta de los dedos de las manos a 60-80 Hz, con lo que se podría controlar la interface de una manera con solo la mano.

En cuanto a la aplicación de RA para tableta, se tiene planeado generar un sitio web para que cualquiera pueda bajar las aplicaciones que desarrollamos de manera gratuita tanto como para Android como para iOS. Así mismo se trabaja en la culminación del libro de realidad aumentada, pues requiere tiempo hacer todas las animaciones y dibujos correspondientes.

5. Agradecimientos

Este trabajo no hubiera sido posible sin el patrocinio de la Rectoría de la Universidad Autónoma de Querétaro y el CONACYT por medio del fondo FOPER, el cual sirvió para la adquisición del equipo empleado. Así mismo queremos agradecer al CONCYTEQ y al Gobierno del Estado de Querétaro

quienes proporcionaron los recursos de transporte y viáticos para la presentación del proyecto en los diferentes planteles.

Referencias

[1] Gee, James Paul. *"What Video Games Have To Teach Us About Learning and Literacy"*, ACM Computer In Entertainment 1 (1): 1–4.
[2] Ishii Hiroshi. *"The tangible user interface and its evolution"*, Communications of the ACM, June 2008/Vol. 51, No. 6

[3] Howard Rheingold, *"Virtual Reality: The Revolutionary Technology of Computer-Generated Artificial Worlds - and How It Promises to Transform Society"*, Simon & Schuster, ISBN-10: 0671778978
[4] Khoshelham K., Elberink S. O., *"Accuracy and resolution of Kinect depth data for indoor mapping applications"*, Sensors (Basel)., vol. 12, no. 2, pp. 1437–54, Jan. 2012.
[5] Shotton J., Fitzgibbon A., Cook M., Sharp T., Finocchio M., Moore R., Kipman A., Blake A., *"Real-time human pose recognition in parts from single depth images"* Cvpr 2011, pp. 1297–1304, Jun. 2011.
[6] Fitzgibbon A., Sharp T., *"Real-Time Human Pose Recognition in Parts from Single Depth Images: Supplementary Material"* Cvpr 2011, vol. 2.
[7] Criminisi A., Shotton J., Advances in Computer Vision and Pattern Recognition. Decision Forests for Computer Vision and Medical Image Analysis, Springer, 2013, p. 368.

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

30. Diseño Instruccional para la enseñanza de la programación de computadoras a estudiantes de Ingeniería Mecatrónica de la UES.

Curiel Aguirre Fernando[1], Jiménez López Eusebio[2], Santiago Sandoval Martha Lorena[3], González Gutiérrez Luz María[4], Olmos Lomas Valeriano[5].

[1] Universidad Estatal de Sonora
Km 6.5 Carretera a Sonoyta, 83400, San Luis R.C., Sonora
fernando.curiel@ues.mx
[2,4] Universidad La Salle Noroeste-CIAAM UTS-IIMM

Resumen

La Mecatrónica es una disciplina que se ha destacado de otras ingenierías, pues los productos que genera son altamente especializados y para su diseño, se requiere de la integración y la sinergia de varios campos del conocimiento, principalmente de la Mecánica, Electrónica y Computación. La Mecatrónica es un campo de estudio relativamente nuevo en México, razón por la cual diversas universidades han aperturado la Carrera de Ingeniería Mecatrónica (CIM). Actualmente, los planes de estudio de la CIM se han estado diseñado con el enfoque por competencias. En este artículo se presenta una propuesta de Diseño Instruccional (DI) para la enseñanza de la programación de computadoras en la CIM en la Universidad Estatal de Sonora (UES). Se describe el modelo Educativo Enfocado en el Aprendizaje y las Competencias del Estudiante (ENFACE) diseñado por UES. Se presenta la aplicación de la metodología activa Aprendizaje Basado en Proyectos (ABProy) en la sistematización del diseño curricular del programa de estudios de la CIM en UES.

Palabras clave: Diseño Instruccional, Metodologías Activas, Aprendizaje Basado en Proyectos.

1. Introducción

La Ingeniería Mecatrónica (IM) es una disciplina relativamente joven con respecto a disciplinas o áreas de estudio existentes como la electrónica, la mecánica, la matemática, entre otras. Las áreas del conocimiento que integran la Ingeniería Mecatrónica han existido durante años e incluso siglos. La esencia de los dispositivos mecatrónicos radica principalmente en que su desarrollo se basa en la combinación sinérgica de las ingenierías mecánica, electrónica, de control y las ciencias computacionales. Para estar acorde con la implementación de nuevas carreras de ingeniería en México, la Universidad Estatal de Sonora (UES) promueve e implementa acciones enfocadas a ofrecer el Programa de Estudio (PE) de Ingeniería Mecatrónica, iniciando en el ciclo 2014-2 en las Unidades Académicas (UA) de San Luis Río Colorado y Hermosillo, Sonora, México, con el objetivo de formar recursos humanos altamente capacitados para desarrollar proyectos que impliquen la utilización de la Ingeniería Mecatrónica.

El presente trabajo, tiene el propósito de establecer las bases y los antecedentes históricos que dieron origen a la Ingeniería Mecatrónica desde antes de acuñarse el término, pasando por desarrollos relacionados con esta área y estableciendo una relación directa con los sistemas de automatización, la

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

teoría del control, los dispositivos electrónicos, las tecnologías de información y comunicación, los sistemas embebidos y muchos otros desarrollos tecnológicos que día a día se van sumando a los recursos, herramientas y competencias que todo ingeniero mecatrónico debe poseer. Posteriormente, se abordarán las propuestas presentadas a los cuerpos académicos y a la comisión de diseño y revisión curricular del PE de Ingeniería Mecatrónica de la UES en relación con las competencias genéricas y los resultados de aprendizaje necesarios para cubrir las necesidades específicas que la industria requiera. Actualmente, diversas empresas requieren contar con ingenieros mecatrónicos que posean habilidades de programación de computadoras y de sistemas embebidos orientados al diseño de dispositivos mecatrónicos, con altos estándares de calidad y sentido de responsabilidad, y que sean capaces de utilizar recursos tecnológicos de avanzada y apegados a las normas y estándares internacionales con el fin de satisfacer las necesidades que su entorno exige.

La metodología propuesta en este trabajo consiste en describir un análisis del nivel de integración que los sistemas mecatrónicos presentan con relación a los lenguajes de programación y a los sistemas embebidos, sustrayendo de este análisis las competencias genéricas y los resultados de aprendizaje que el estudiante debe desarrollar a lo largo de su carrera. En base a lo anterior, se elabora una propuesta de los contenidos mínimos deben integrar en asignaturas como: Tecnologías de Información y Comunicaciones (Tics), Lenguajes de Programación, Microcontroladores, Redes de Comunicación Industriales y PLCs.

2. Antecedentes

Para establecer un punto de partida en el desarrollo y la propuesta del programa de Ingeniería Mecatrónica en UES, es necesario analizar el origen de la Mecatrónica, su evolución y desarrollo en México, así como sus relaciones con los diferentes enfoques y modelos educativos.

A. Origen de la Ingeniería Mecatrónica.

La Ingeniería Mecatrónica desde una perspectiva relacionada con la automatización ha existido desde años inmemorables. Algunos de los primeros sistemas aparecieron en Grecia en el año 300 A.C. y desde entonces se han desarrollado y perfeccionado de las distintas disciplinas que la Ingeniería Mecatrónica engloba. Sin embargo, una de las etapas más importantes que da pauta para el surgimiento de la mecatrónica moderna, es sin duda el desarrollo del microprocesador en 1960. Así nace el control computarizado que sumado al control numérico clásico, dan origen a los sistemas CNC, los cuales fueron y son utilizados en el diseño y fabricación de aeronaves. Cohetes, misiles, sondas espaciales y satélites, son sistemas complejos implementados gracias a la teoría del control moderna. Trabajos como los métodos de control en el dominio del tiempo, desarrollados por Liapunov, Minorsky y otros, han contribuido al perfeccionamiento de este importante campo de la ingeniería. Los avances en semiconductores fueron de gran importancia en el desarrollo de sistemas integrales que incorporan subsistemas electrónicos y mecánicos. En el año 1969 la empresa japonesa Yaskawa Electric Co. acuña el término de *mecatrónica* para representar los “sistemas integrales”. En 1972 se le otorga a la empresa Yaskawa el derecho reservado del término Mecatrónica pero debido a su amplio uso, en 1982 fue posible utilizar el término libremente [1].

En 1970 la Japan Society for the Promotion of Machine Industry (JSPMI) clasifica los productos mecatrónicos en cuatro categorías. Las características de estos dispositivos van desde sistemas principalmente mecánicos con adecuaciones electrónicas básicas hasta sistemas tradicionalmente mecánicos con importantes implementación electrónicas, sistemas que conservan funcionalidad de un sistema mecánico pero que internamente se sustituyen por subsistemas electrónicos y sistemas diseñados a través de un proceso de integración sinérgica [2].

Con respecto a la área académica, la mecatrónica hizo su aparición en la primera revista arbitrada “Transactions on Mechatronics”, publicada por IEEE/ASME y donde surgió el concepto de mecatrónica,

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

definiéndola como: *La combinación sinérgica de la ingeniería mecánica de precisión, el control electrónico y los sistemas inteligentes para el diseño de productos y procesos de manufactura*.

Por otro lado, los Estados Unidos de América (EUA) es uno de los pocos países que han estado integrando temas del área mecatrónica, ya que ha realizado estudios serios en cuanto a la pertinencia de la asignatura mecatrónica en el los planes de estudio regulares y las competencias genéricas a desarrollar en estudiantes de nivel bachillerato y licenciatura [3].

B. La Ingeniería Mecatrónica en México.

En México, la educación en Ingeniería Mecatrónica se aborda a finales de los años ochenta, cuando algunas universidades comienzan a integrarla como asignatura en Planes de Estudios (PE) relacionados con manufactura, mecánica, electrónica, entre otras. Para 1990, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), la Universidad Anáhuac del Sur (UAS) y el Instituto Politécnico Nacional (IPN), ofrecen las primeras asignaturas orientadas a la enseñanza del concepto de la mecatrónica en sus PE de licenciatura y posgrado. Posteriormente, en 1994 la UAS y en 1997, la Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas (UPIITA) del IPN, ofrecen por primera vez, la licenciatura en Ingeniería Mecatrónica en México. A finales de los noventas otras cuantas universidades comienzan a ofrecer el PE de Ingeniería Mecatrónica a nivel licenciatura como el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) en 1997 y desde el 2000 los programas de Maestría y Doctorado en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica.

Actualmente no existe legislación apropiada para la normalización de la actividad relacionada con la Ingeniería Mecatrónica. Sin embargo, el Comité de Normalización de Competencia Laborales (CONOCER) menciona algunas relacionadas con la Industria Electrónica y desarrolló la Norma Técnica de Competencia Laboral aplicada al ensamble de equipos con características mecatrónicas, la cual se limita exclusivamente a la descripción de las competencias básicas que el trabajador debe tener para desempeñar actividades de ensamble y preparación de los componentes mecatrónicos.

C. Surgimiento de la Ingeniería Mecatrónica en la Universidad Estatal de Sonora.

La Universidad Estatal de Sonora inicia en 1980 como Universidad de San Luis Río Colorado en ese mismo estado, quedando adscrita a la Universidad de Sonora (UNISON) y ofertando carreras de: Contaduría Pública, Administración de Empresas, Ingeniería Civil, Ingeniería Industrial y Agronomía con una planta docente de 24 profesores y una población de 300 alumnos. Tres años después, mediante la ley número 28, decretada por el gobierno del estado de Sonora, la Universidad de San Luis Río Colorado se separa de la UNISON para convertirse en el Centro de Estudios Superiores del Estado de Sonora (CESUES). En 1993 inician los PE de Ingeniería Industrial en Electrónica. En los próximos 5 años, el CESUES se fortalece con la implementación de su programa educativo de posgrado con la Maestría en Administración, con sede en San Luis Río Colorado y la puesta en marcha de nuevas Unidades Académicas (UA) en otras ciudades como Magdalena y Villa de Juárez, Sonora. En el 2005, parte de planta de maestros adscritos a los PE de Ingeniería Industrial e Ingeniería Industrial en Electrónica, cursan la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica, impartida por el Instituto Tecnológico Superior de Cajeme (ITESCA). En 2012 el CESUES se convierte en la Universidad Estatal de Sonora (UES) por decreto gubernamental, también en este mismo año comienzan los trabajos de reestructuración para los PE de Ingeniería Industrial e Ingeniería Industrial en Electrónica, los cuales a partir del ciclo 2014-2 se convertirían en los PE de Ingeniería Industrial en Manufactura e Ingeniería Mecatrónica respectivamente [4].

3. Modelo ENFACE de la UES

La Universidad Estatal de Sonora (UES) tiene como misión: contribuir al progreso social del país, atendiendo las prioridades del desarrollo integral del estado de Sonora por medio de sus funciones de

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

docencia, investigación, extensión del conocimiento y difusión de la cultura, además de formar a los estudiantes con programas dirigidos a lograr un sólido conocimiento disciplinario y práctico de la profesión, así como al fomento de actitudes que fortalezcan la conciencia de nacionalidad, el pensamiento solidario con el bien social y una visión creativa e innovadora.

Acorde con el compromiso de innovación que la UES promueve, se crea el modelo Educativo Enfocado en el Aprendizaje y las Competencias del Estudiante (ENFACE), que trasciende de un modelo basado en la acumulación de información a otro fundamentado en la actitud permanente y activa de aprendizaje [5]. El modelo educativo ENFACE se basa principalmente en tres ejes los cuales se muestran en la Figura 1.

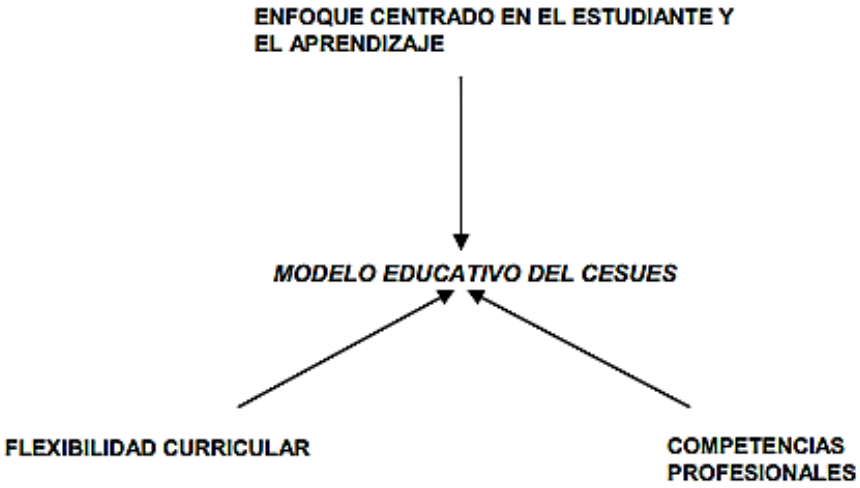


Figura 1. Modelo educativo del CESUES

A. Flexibilidad curricular y académica administrativa.

La flexibilidad en el modelo educativo determina las opciones por las que se incorporan progresivamente los procesos operativos, diversos elementos académicos y administrativos que están orientados a garantizar condiciones favorables al ingreso, permanencia y egreso de los jóvenes. Su expresión se logra en aspectos operacionales como lo son: Perfiles de egreso y trayectorias de formación diversas, selección de parte de la trayectoria de formación y planificación del tiempo de egreso a conveniencia del estudiante con opciones de movilidad tanto interna como externa y atribución de créditos a las carreras o Programas de Estudio ofertados.

B. Formación basada en competencias profesionales.

El modelo educativo ENFACE integra el Aprendizaje Basado en Competencias (ABC) como uno de sus tres ejes entendiéndose como competencia profesional, a la capacidad de un sujeto para realizar una actividad profesional a partir de la integración de los conocimientos, habilidades, actitudes y valores requeridos en tal actividad, considerando ciertos parámetros deseables en su ejecución. En el marco de referencia de Tuning a esta capacidad se les llama *resultados del aprendizaje*. Los resultados del aprendizaje pueden definirse como afirmaciones de lo que se espera que deba saber, comprender y/o ser capaz de demostrar un estudiante después de haber completado un programa de aprendizaje [6]. Los programas educativos de la UES están diseñados con base en dos niveles de competencias:

- Genéricas. Competencias que corresponden con las propuestas por el TUNING (instrumentales, interpersonales y sistemáticas).
- Específicas. Competencias propias de cada programa educativo, derivadas de los requerimientos disciplinarios y contextuales de las profesiones.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

C. Enfoque educativo centrado en el estudiante y el aprendizaje.

La aplicación de este enfoque en el proceso de Enseñanza Aprendizaje (EA) permite que el estudiante adquiera conocimientos y experiencias propias de su formación profesional, pero además, también desarrolla habilidad cognitiva de "aprender a aprender". Este eje también describe cuatro características que deben integrarse al enfoque centrado en el estudiante y el aprendizaje como lo son:

- Integración de las NTIC's con la intención de promover el aprendizaje significativo en base al uso y aprovechamiento de las tecnologías disponibles.
- Aplicación de metodologías y técnicas, como son el Aprendizaje Basado en Problemas (ABP), el método de casos, el Aprendizaje Basado en Proyectos (ABProy), Aprendizaje Basado en Prototipos Rápidos, entre otros, resaltando la característica de centrarse en el estudiante y en el aprendizaje significativo, incorporando el desarrollo de estrategias cognitivas, con la finalidad de posibilitar la eficiente integración, retención y transferencia de conocimiento, elevar la motivación del estudiante, estimular su capacidad para identificar problemas y ofrecer soluciones adecuadas.
- Estrategias de enseñanza basadas en la modificación de secuencias de contenidos de estudio, ordenándolos a partir de las exigencias de la industria, con base en problemas que den lugar a investigaciones y permitan integrar contenidos de una o más disciplinas y mediante la utilización del aprendizaje en diversos contextos sociales, profesionales o personales.
- Fortalecimiento de las estrategias de enseñanza, concebidas como las acciones que desarrolla el facilitador para seleccionar, organizar y presentar los contenidos de la asignatura que imparte de manera que incidan en forma directa e indirecta en el aprendizaje de los estudiantes.

4. Modelos de Diseño Instruccional (DI).

El desarrollo de un Programa de Estudio en particular implica una serie de tareas relacionadas de manera sistémica. Las tareas pueden conceptualizarse a través de modelos los cuales contienen diferentes fases del proceso EA. Los modelos de DI datan de 1960 y existen un gran número de ellos [7]. Sin embargo, la mayoría de estos modelos, incorporan cinco fases. Dichas fases son: Análisis, Diseño, Desarrollo, Implementación y Evaluación, también conocidas como ADDIE.

A. Modelo ADDIE.

El modelo de DI ADDIE, está basado en la aproximación "en cascada" que se da al proceso de EA y que asume una "construcción lineal" de las competencias en los estudiantes (ver Figura 2).

Figura. 2 Modelo ADDIE

Análisis: El DI tiene como base analizar los resultados del aprendizaje que se pretenden alcanzar en relación al PE de Ingeniería Mecatrónica de la UES, tomando en cuenta las fortalezas y oportunidades en cuanto a infraestructura, recursos académicos y perfiles de los estudiantes y de la planta docente.

Diseño: Esta fase implica la utilización de los resultados de la fase de análisis, con la finalidad de diseñar estrategias de EA que den solución a las oportunidades encontradas y al uso eficiente de los recursos disponibles.

Desarrollo: En esta fase se generan los planes de clase involucrando las secuencias didácticas y las características específicas del grupo de estudiantes objetivo. También durante esta fase se

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

desarrolla la instrucción, los medios que serán utilizados y cualquier documento de apoyo como manuales del curso y de prácticas, incluyendo hardware y software cumpliendo con las características de la instrucción basada en la computadora.

Implementación: Esta fase se refiere específicamente a la acción de instrucción en el salón de clases, incluso en ambientes virtuales. Se debe proporcionar de manera eficiente la instrucción, promoviendo la comprensión del material por parte de los estudiantes y el facilitador debe asegurar el dominio de los objetivos y la transferencia de conocimiento en el contexto del Programa Educativo.

Evaluación: En esta fase se mide la eficiencia de la instrucción, sin embargo, acorde con el modelo ENFACE, es necesario que la evaluación esté presente durante todo el proceso del DI dentro, entre y después de cada una de las fases. La evaluación debe ser formativa y sumativa (ver Figura 3).

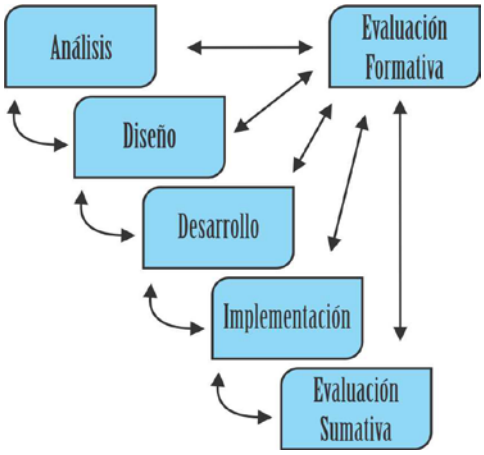


Figura. 3 Modelo ENFACE

B. Modelo ASSURE

El modelo ASSURE hace referencia por sus siglas en inglés a seis fases relacionadas con el DI. Dichas fases proporcionan información acerca de las características que los estudiantes deben dominar por medio de la fase “Analyse Learners”. La fase “State Objetives” trata de los resultados de aprendizaje con los que el estudiante debe contar al finalizar la Instrucción. La fase “Select Media and Material” establece una lista de estrategias, tecnologías e infraestructura necesarias para alcanzar los objetivos del Programa de Estudios. La fase “Utilize Media and Materials” está relacionada con la utilización de tecnologías y estrategias de EA elegidos en la fase anterior. La fase “Require Learner Participation” fomenta la participación de los estudiantes a través de estrategias de EA activas y cooperativas. Por último, la fase de “Evaluation and Revise” proporciona retroalimentación acerca del el avance formativo del estudiante, llevando esto a una reflexión profunda que promueva un cambio de estrategias de EA en caso de ser necesario [8]. Los seres humanos adquieren reglas conductuales que conforman habilidades, las cuales facilitan llevar a cabo operaciones simbólicas de diversos tipos: utilizar el lenguaje, resolver problemas matemáticos, componer y ejecutar música, interactuar con otras personas, etc. El conocimiento de estas reglas (conocimiento procedimental) implica una ejecución altamente precisa y predecible, mientras que el poseer conocimiento declarativo implica poder enunciar el significado de un conjunto de ideas y construir conocimiento en función de él [9].

5. Lenguajes de programación para el PE de Ingeniería Mecatrónica (objetivos)

Las competencias pueden diferir entre una disciplina y otra. Para elaborar programas transparentes y comparables a nivel latinoamericano, es necesario conseguir resultados del aprendizaje

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

y competencias para el PE de Ingeniería Mecatrónica. La definición de estas competencias es parte del trabajo académico que el facilitador realiza en conjunto con las academias y los diferentes departamentos administrativos de la universidad. Definir competencias y resultados del aprendizaje apropiadamente, hace posible garantizar la calidad, y una evaluación interna a nivel nacional e internacional [10]. Las competencias genéricas relacionadas con el PE de Ingeniería Mecatrónica versus competencias específicas del programador de computadoras, deben ser un referente para el DI de la asignatura de Lenguajes de Programación (LP). A continuación se listan las competencias genéricas que se relacionan con la asignatura de Lenguajes de Programación y transversalmente con el PE de Ingeniería Mecatrónica.

- *Competencias genéricas y específicas del PE de IM.*

Las competencias genéricas mostradas en la Tabla 1, propuestas para el PE de IM, se relacionan con las competencias genéricas de todas las ingenierías y se dividen en instrumentales, interpersonales y sistémicas.

Las competencias específicas del Programa Educativo de Ingeniería Mecatrónica de la UES, son producto de una extensa investigación tanto bibliográfica como de campo. En la Tabla 1 se puede observar la relación que guardan las competencias específicas del PE de IM con las Tecnologías de Información y Comunicaciones (TICs) y, por consiguiente de la asignatura de Lenguajes de Programación (LP).

Tabla. 1 Competencias del PE en mecatrónica contra TICS

Competencias Genéricas	Resultados de Aprendizaje en TICs	Resultados de Aprendizaje en LP
Diseñar prototipos y modelos para la solución de problemas seleccionando las tecnologías adecuadas para integrar sistemas mecatrónicos y de automatización.	Integrar tecnologías para el diseño Mecatrónico. Dominar el software especializado para el diseño implementación de dispositivos mecatrónicos mediante la automatización.	Realiza modelado de dispositivos mecatrónicos mediante la programación de scripts en software especializado.
Identificar, evaluar y seleccionar sistemas de automatización y control de procesos, productos mecatrónicos y servicios industriales.	Automatizar sistemas mecatrónicos, mediante la utilización de hardware de comunicaciones y la manipulación de información por medio de dispositivos programables.	Provee soluciones eficientes mediante scripts y programas en lenguajes de alto nivel susceptibles de ser embebidos en hardware y sistemas mecatrónicos.
Identificar, analizar y seleccionar las metodologías apropiadas para el diseño de sistemas mecatrónicos factibles.	Competencias genéricas en el uso de las TICs relacionadas con el uso de esta para la integración y presentación de proyectos mecatrónicos.	No existe relación directa entre ésta competencia genérica y los resultados de aprendizaje en LP.

6. Diseño curricular del PE de IM.

Para el diseño curricular del PE de IM en UES, se utiliza la metodología de DI Rapid-Prototyping basándose en el enfoque ENFACE (por competencias) y el Aprendizaje Basado en Proyectos (ABProy).

El ABProy es una estrategia integradora que trasciende a la pedagogía activa, promueve pensar y actuar con base en el diseño de un proyecto, elaborando un plan con estrategias definidas, para dar

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

una solución a una interrogante y no tan sólo cumplir objetivos curriculares. Esta estrategia de aprendizaje permite un acercamiento entre la realidad laboral y ambiente académico. El ABProy es un método flexible, sin embargo dicha metodología activa se fundamenta en cuatro fases relacionadas con el Aprendizaje Basado en Proyectos [11], las cuales se describen a continuación:

1) Información: En esta fase, el facilitador tiene claros los resultados de aprendizaje de la asignatura y cuenta con información de los estudiantes, como: gustos, preferencias, estilos de aprendizaje, etc.
2) Planificación: La información es la base para elaborar planes de trabajo, estructurar procedimientos metodológicos, desarrollar instrumentos y medios de trabajo, y elegir entre las posibles variables o estrategias de solución a seguir.
3) Realización: Esta fase supone la ejecución de los instrumentos y estrategias producidos en la planificación, con sentido experimental y de investigación, ejercitándose la acción creativa, autónoma y responsable del estudiante.
4) Evaluación: Cada instrumento surgido en la fase de planificación y ejecutado en la fase de realización, debe ser evaluado con métodos adecuados a cada instrumento.

Bajo este enfoque del ABProy se diseñaron los ambientes necesarios para alcanzar las competencias y resultados del aprendizaje en los estudiantes de la asignatura de Lenguajes de Programación del PE de Ingeniería Mecatrónica. Al considerar el primer paso de la metodología seleccionada (**información**), se puede observar en la Tabla 2 los resultados de los aprendizajes necesarios para la acreditación de las competencias relacionadas con el PE, que de alguna manera también se relacionan con la programación de computadoras o de dispositivos embebidos.

Tabla. 2 Resultados del aprendizaje

Resultados del aprendizaje para la competencia: Diseñar prototipos y modelos para la solución de problemas seleccionando las tecnologías adecuadas para integrar sistemas mecatrónicos y de automatización.	
A)	Identificar y aplicar los elementos del análisis, diseño y programación estructurada y orientados a objetos.
B)	Analizar distintos métodos de evaluación económica de solución para la toma de decisiones.
C)	Analizar la arquitectura, funcionamiento y programación de un microcontrolador.
D)	Desarrollar programas para la representación gráfica utilizando la filosofía de los paquetes CAD.
E)	Aplicar los métodos y estructuras de los lenguajes de programación para el diseño y control de robots.
F)	Aplicar la integración de sistemas neumáticos, electroneumáticos, hidráulicos, electrohidráulicos y dispositivos programables para la automatización de sistemas mecatrónicos.
G)	Diseñar sistemas industriales automatizados utilizando los controladores lógicos programables.
H)	Aplicar la metodología de investigación de mercados y el proceso de planeación en la elaboración del diseño de un proyecto de inversión en el área Mecatrónica.

Adicionalmente se puede cruzar la información descrita en la Tabla 2 con las asignaturas relacionadas al PE de Ingeniería Mecatrónica que corresponden con los resultados de aprendizaje señalados en los incisos A al H (ver Tabla 3).

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Tabla. 3 Cruce de información

Asignatura	Resultados de aprendizaje que cubre la asignatura:							
	A	B	C	D	E	F	G	H
Programación para Ingeniería	X							
Ingeniería Económica		X						
Microcontroladores	X		X		X	X		
Diseño Asistido por Computadora				X				
Robótica	X		X		X	X		
Automatización Industrial	X		X		X	X		
Manejo de PLC					X	X	X	
Proyectos de Ingeniería		X						X

Se puede observar en la Tabla 3 que, tanto las competencias genéricas como las específicas, se alinean para proporcionar el perfil del estudiante al terminar de cursar las asignaturas de Lenguajes de Programación, Robótica, Microcontroladores y Manejo de PLC. Algunas de estas competencias y habilidades son:

- Análisis y diseño de sistemas.
- Toma de decisiones.
- Programación de Sistemas Embebidos.
- Diseño de mecanismos en computadora.
- Análisis de mecanismos y simulación por computadora.
- Representación de la cinemática de un robot en un programa escrito en algún lenguaje de programación.
- Codificación de programas para la automatización Industrial.

Por otro lado, la etapa de **planificación** consiste en elaborar los planes de trabajo en base a los conocimientos previos del estudiante con el objeto de alcanzar las competencias deseadas y para ello, existen un sinnúmero de estrategias y metodologías, como son: Elaboración de actividades, temporización, orientaciones metodológicas y descripción de las tareas, entre otras.

La etapa de **realización** no es más que la ejecución de los planes descritos en la etapa anterior.

La **evaluación** como última etapa del ABProy, es una de las más importantes ya que con esta actividad se debe constatar si los estudiantes adquirieron las competencias del PE relacionadas con la asignatura de Lenguajes de Programación. Las acciones relacionadas con la evaluación tienen similitud con la etapa de planificación ya que son éstas las que se evaluarán. La temporización, orientaciones metodológicas y la descripción de los ejercicios, son algunas de las características mediante las cuales se valorará el nivel y la calidad del aprendizaje adquirido por los alumnos.

7. Conclusiones

En el caso de los PE de ingeniería de la UES, se ha mejorado la calidad de las estructuras cognitivas que el estudiante adquiere en la asignatura de Lenguajes de Programación, al basarse en el

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

DI por medio del desarrollo de prototipos, se ha pasado de lo interdisciplinar a lo transdisciplinar, dando como resultado rescatar al 50% de los estudiantes en riesgo de reprobación en la asignatura de TICs y Lenguajes de Programación en el ciclo escolar 2014-2. Apoyados en esto resultados se están proponiendo una serie proyectos institucionales en pos del desarrollo integral de los estudiantes de Ingeniería Mecatrónica; un ejemplo de esto es la "Convocatoria para la construcción de prototipos 2015" que realiza la UES, con el fin de tender una red de transferencia de conocimiento en instituciones educativas como UT San Luis R.C., UABC, ULSA, CONACYT, asociaciones como Asociación Mexicana de Mecatrónica, SOMECE entre otras relacionadas con los PE en general y el PE de Ingeniería Mecatrónica de la UES en particular. Por otro lado, el Diseño Instruccional desarrollado en este trabajo, permitió elaborar una propuesta de los contenidos mínimos deben integrar en asignaturas como: Tecnologías de Información y Comunicaciones (Tics), Lenguajes de Programación, Microcontroladores, Redes de Comunicación Industriales y PLCs. En relación con la utilización de la metodología activa ABProy, la aplicación de las cuatros fases permitieron sistematizar el diseño curricular del PE de IM en UES.

8. Agradecimientos

Los autores agradecen a la RED Interinstitucional ALFA, a la RED Noroeste, y a los directivos de las instituciones educativas UES y ULSA Noroeste por apoyo brindado para la realización de este trabajo.

Referencias

[1] Vargas E. "*Metodología aplicada al desarrollo de máquinas mecatrónicas". Congreso Latinoamericano de Instrumentación y Control de Procesos.* Universidad Autónoma de Querétaro. México. 2012.
[2] Kyura N., Oho H., *"Mechatronics—an industrial perspective." IEEE/ASME Transactions on Mechatronics", Vol. 1, No. 1*, pp. 10–15. 1996.
[3] University of Texas at Austin, "Enriching Economy," University of Texas at Austin, Austin, 2002. [Online]. Available: http://www.ues.mx/seccion.aspx?s=1. [Accessed 15 December 2014].
[4] UES, Universidad Estatal de Sonora, "UES-Universidad Estatal de Sonora," UES-Hermosillo, Diciembre 2014. [Online]. Available: http://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/19059/ic2-2002-austin-clean-energy.pdf?sequence=2. [Accessed 10 December 2014].
[5] UES. Documento Institucional Modelo Educativo ENFACE, Universidad Estatal de Sonora, México, 2007. (http://www.ues.mx/Docs/aspirantes/modelo/LBG_modelo_ENFACE.pdf).
[6] González J., *"Tuning Educational Structures in Europe", Universidad de Deusto*, pp. 33–50. 2003.
[7] McGriff J.S. "Instructional Systems", *Penn State University,* 2000.
[8] Smaldino E., Russell D., Heinich R., Molenda M. *"Instructional Technology and Media for Learning", Prentice Hall,* pp. 46–78. 2004.
[9] Gagne R. *"The Conditions of Learning" (4th). New York: Holt, Rinehart & Winston*. 1985.
[10] González J., Wagenaar R., Beneitone P. "*Tuning-América Latina: Un proyecto de las Universidades", Revista Iberoamericana de Educación, No. 35*, pp. 151-164. 2004.
[11] Jiménez L., Hernández E., Bojórquez I., Navarro L., Gaytán L., et al, "*Aprendizaje Basado en Proyectos en el desarrollo de un sistema mecatrónico", 13º Congreso Nacional de Mecatrónica, Universidad Autónoma de Querétaro,* 2014.

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

31. Embotelladora Automatizada por medio de PLC

Méndez Guzmán Hugo Antonio, Alvizo García José de Jesús, Bonilla Anguiano Cristo Manuel, Rangel Gamiño Juan, Roaro Moreno Josué Francisco.

hmendezg@upbicentenario.edu.mx

Universidad Politécnica del Bicentenario
Carretera Silao-Romita km. 2, San Juan de los Duran, C.P. 36283. Tel. (472) 72 38 700

Resumen

En este artículo se describe el proceso de una embotelladora seguido de una pequeña etapa de empaquetamiento, este tipo de sistema se puede implementar en cualquier industria alimenticia enfocada en el trato de líquidos y procesos afines. Se ha aplicado la automatización para controlar este proceso mediante la implementación de un PLC SIEMENS SIMATIC S7-300. Para la programación del PLC se hace uso del lenguaje KOP.

Palabras clave: Embotelladora, PLC SIEMENS, Automatización.

1. Introducción

La automatización es un sistema donde se trasfieren tareas de producción, realizadas habitualmente por operadores humanos a un conjunto de elementos tecnológicos.

Un sistema automatizado consta de dos partes principales:
Parte de mando
Parte Operativa

La Parte Operativa es la parte que actúa directamente sobre la máquina. Son los elementos que hacen que la máquina se mueva y realice la operación deseada. Los elementos que forman la parte operativa son los accionadores de las máquinas como motores, cilindros, compresores y los captadores como fotodiodos, finales de carrera entre otros sensores.

La Parte de Mando suele ser un autómata programable, aunque hasta hace poco se utilizaban relés electromagnéticos, tarjetas electrónicas o módulos lógicos neumáticos. En un sistema de fabricación automatizado el autómata programable esta en el centro del sistema. Este debe ser capaz de comunicarse con todos los constituyentes de sistema automatizado. En este caso la estructura de la embotelladora junto con el PLC son la parte de mando y en cuanto a la parte operativa se encuentran los motores, cilindros y todos los sensores encargados de detectar la posición de la botella durante todo el proceso. Este proyecto como tal se dirige como un subproceso para una celda de manufactura (figura 1) enfocada en la industria de bebidas en general, del cual se desprenden otros subprocesos que en complemento con este sistema de embotellamiento se logra una celda de manufactura que abarca todo el tratamiento de líquidos para embotellarlos, clasificarlos y empaquetarlos.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

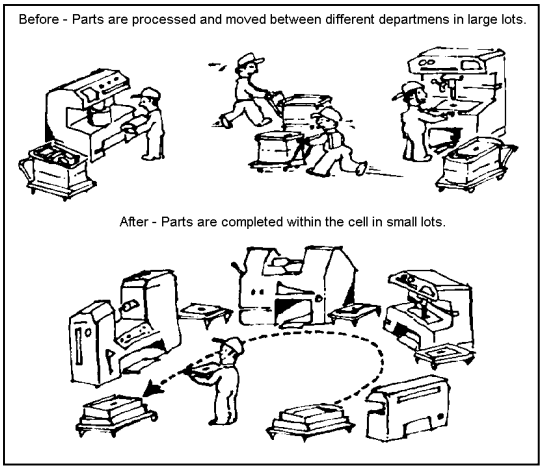


Figura 1. Esquema de una celda de manufactura.

2. Descripción del sistema

El sistema de embotellamiento que se desarrolló permite el llenado, roscado y empaquetado en cuartetos de botellas con la capacidad de 400 ml. El sistema consta de tres cilindros neumáticos de doble efecto con una carrera de 100mm, un gripper neumático, 7 sensores micro switch, 4 sensores fotoeléctricos LM393, una banda transportadora y cuatro motores de los cuales son tres motores de corriente directa y un motor a pasaos bipolar. Para fines de mayor entendimiento nombraremos a los actuadores anteriormente mencionados como: cilindro A, cilindro B y cilindro C.

2.1. Etapa de llenado

La acción de llenado se compone del cilindro A al cual se le posicionó una manguera que en uno de sus extremos se conecta a una pequeña bomba hidráulica en su otro extremo se coloca al vástago del actuador y a un acople de mangueras metálico que realiza la acción del inyector (figura 2), este inyector suministrará líquido durante una cierta cantidad de tiempo ya prestablecida por un timer.

Esta etapa se lleva acabo cuando el sensor de la primera posición S1 detecta que la botella está en el lugar correcto y el cilindro A está en reposo.

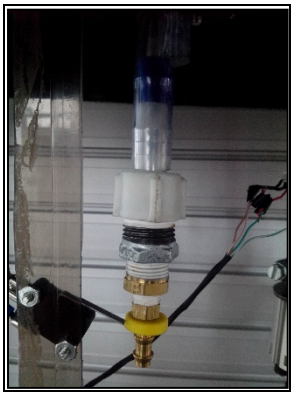


Figura 2. Manguera de inyección del líquido con su acople.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

2.2 Etapa de cerrado

Para cerrar la botella se acopló al cilindro B un motor a pasos MP y un gripper neumático unido al motor por medio de un tren de engranes para aumentar el torque y así de esta manera el motor pueda girar el gripper sin mayor dificultad (figura 3).

El gripper se encarga de sujetar la taparrosca para que al momento en que el motor produce el giro la taparrosca comience a cerrar la botella. El motor a pasos se programó con el número de vueltas necesarias para cerrar completamente la botella y así poder pasar la siguiente etapa.

Figura 3. Mecanismo encargado de cerrar la botella.

Para que esta acción se ejecute la botella ya debe de estar llena, el sensor de la segunda posición S2 debe estar detectando a la botella y el cilindro B debe estar en reposo.

Figura 4. Gripper neumático.

2.3 Etapa de expulsión

En esta etapa la botella se expulsa hacia la siguiente fase que es la transportación hacia la caja donde será depositada. La botella se sostiene mediante una sujeción que se implementa en el extremo del vástago del cilindro C (figura 5), este actuador se mantiene en reposo y sujetando la botella durante todo el proceso hasta que es detectada por el sensor de la tercera posición S3. Una vez detectada la botella, el cilindro C se acciona y se retrae rápidamente ocasionando que la botella salga de la estación de llenado para caer en la banda transportadora anteriormente mencionada y así seguir con el proceso.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Figura 5. Cilindro con sujeción.

Así mismo se implementa una banda transportadora impulsada por un motor eléctrico BT después de la etapa de expulsión, y con el objetivo de trasladar la botella una vez llena y cerrada hacia la estación de empaquetamiento (figura 6). La banda funciona con un motor de corriente directa con alimentación de 12v y se acciona cada que el sensor S4 detecta que la botella ya fue expulsada, esta banda transportadora se programó mediante un timer que una vez transcurrido cierto periodo de tiempo se detendrá en el momento que la botella esté en el otro extremo de la banda transportadora para así de esta manera ser depositada en un contenedor.

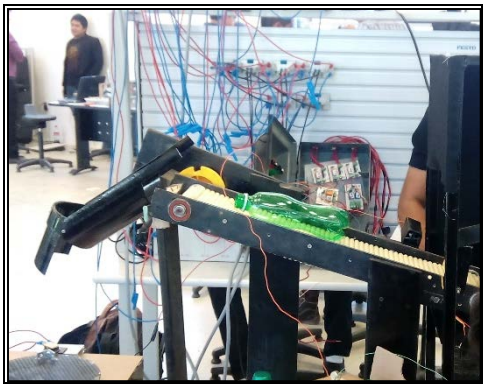


Figura 6. Banda transportadora.

2.4 Almacenamiento

En esta etapa se tiene una caja sobre una base giratoria, denominada como CAJA en el diagrama espacio-fase de la figura 13. El funcionamiento de esta etapa de ir depositando las botellas dentro del contenedor que está divido en cuatro para almacenar grupos de botellas.

Como se mencionó anteriormente la banda transportadora es la encargada de llevar las botellas hasta el contenedor, para depositar la botella dentro del contenedor se construyó una canaleta por la cual viajará la botella para ser almacenada de una forma precisa. Cada vez que cae una botella dentro del contenedor la base giratoria se acciona y rota 45° quedando en posición de recibir la siguiente botella, esta rutina se realizará hasta llenar el contenedor con cuatro botellas.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

3. Control del sistema

Para controlar este proceso, además del PLC se hizo uso de once sensores que indican la posiciones que adopta cada parte del proceso, los sensores utilizados fueron: siete sensores micro switch y cuatro sensores fotoeléctricos LM393.

El uso de los sensores de micro switch permite la detección de inicio y fin de carrera para cada actuador neumático (figura 7), es decir, indican cuando el actuador está en reposo o activo.

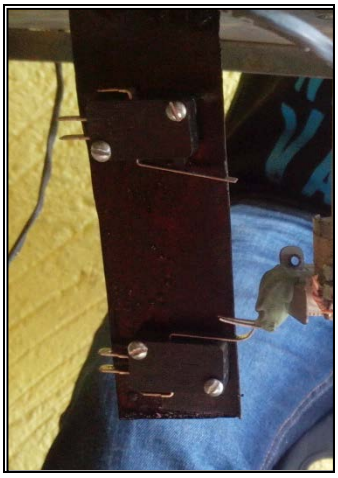


Figura 7. Inicio y fin de carrera.

Estos sensores son de contacto directo, es decir, se acopló una delgada placa de metal a los vástagos de los cilindros para que accionen directamente los sensores micro-switch (figura 8).

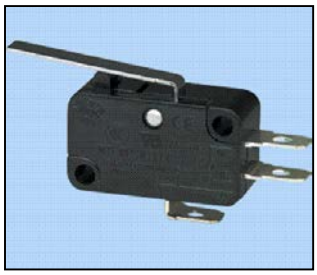


Figura 8. Sensor micro-switch.

Por otra parte los sensores fotoeléctricos LM393 (figura 9) son usados para detectar en que parte del proceso se encuentra la botella y que acción es la que se debe realizar, además de que resulta fácil de acoplar dado a su tamaño reducido y su rango de detección satisface las exigencias del proceso.

Los sensores LM393 se ubicaron en lugares específicos del sistema para tener el control sobre la posición de la botella a lo largo de todo el proceso (figura 10). Para el funcionamiento correcto de estos sensores fue necesario crear una cubierta para los mismos, dado que la luz ambiente altera su funcionamiento, tal que las cubiertas no dejen pasar la luz y de esta manera los sensores trabajen de acuerdo a lo esperado.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

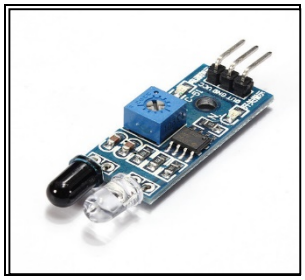


Figura 9. Sensor fotoeléctrico LM393.

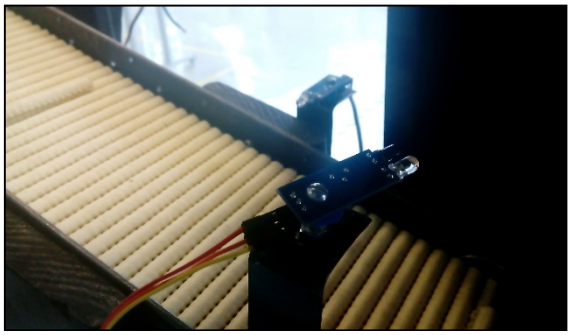


Figura 10. Disposición de sensores de proximidad.

Estos sensores se activan al detectar cualquier objeto en un rango de 0cm a 30cm dejando pasar una señal de 5V la cual usamos para controlar el proceso de la embotelladora.

4. Movimiento eléctrico del sistema

Como se mencionó este sistema funciona con cuatro motores, tres motores de corriente directa y un motor a pasos, los motores de corriente directa se desempeñan de la siguiente manera: uno es para hacer girar la base donde se encuentra la botella y así de este modo llegar a cada estación del proceso, otro motor se localiza en un eje de la banda transportadora y es el encargado de hacer girar a la banda para transportar la botella hacia la etapa de empaquetado y por último el motor restante se encarga de hacer girar otra base en la cual se encuentra la caja donde se depositarán las botellas una vez finalizado el proceso (figura 11).

Por último, con respecto al motor a pasos MP que se mencionó con anterioridad se acopló a un mecanismo diseñado para hacer girar al gripper neumático y de esta manera cerrar la botella dejando a la misma lista para la etapa de expulsión.

Figura 11. Sistema de empaquetamiento.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

5. Descripción del proceso

Para realizar el control del proceso bajo la programación del PLC es necesario la implementación de un diagrama de estados de sensores y actuadores del sistema en cada etapa (diagrama espacio-fase) tal como lo muestra la figura 12, tal que se puedan deducir las ecuaciones lógicas que rigen la activación de cada uno de los actuadores.

La tabla 1 muestra las condiciones lógicas necesarias para la activación de avances (A+, B+, C+, D+) y retrocesos (A-, B-, C-, D-) de los cilindros neumáticos, condiciones de activación de los actuadores eléctricos bajo motor M y MP, así como las condiciones de operación para la electroválvula de llenado BOM.

Tabla 1. Ecuaciones lógicas que rigen la operación de actuadores del proceso.

Condición lógica de operación	Actuador
$S1\,A0\,\overline{m4}$	$A+$
$\overline{t1}\,A1$	$A-$
$S2\,B0$	$B+$
$CONT$	$B-$
$S3\,C0$	$C+$
$C1$	$C-$
$m3$	$D+$
$\overline{m3}$	$D-$
$A1$	BOM
$m1\,A0$ or $m2\,B0$ or $t3$	M
$B1$	MP

Por otra parte para enclavar o memorizar algunos estados del proceso es necesario implementar un sistema de memorias que permita la toma de decisiones a través de las etapas del proceso. La tabla 2 muestra las condiciones de activación y desactivación de este sistema de memorias.

Tabla 2. Condiciones de activación y desactivación del sistema de memorias del proceso.

Memoria del Proceso	SET	RESET
$m1$	$A1$	$S2$
$m2$	$B1$	$S3$
$m3$	$S1$	$COMP$
$m4$	$A1$	$C1$
$m5$	S	$t2$

Donde COMP, CONT, t1, t2 y t3 son componentes de un sistema de control para servomotor basado en timers retroalimentados, un contador y un comparador que reinicia el conteo para la generación de pasos para el motor a pasos MP.

En el diagrama espacio fase de la figura 12 se muestran la representación gráfica del movimiento de los actuadores y estados del sistema descrito en secciones anteriores, donde A, B y C son cilindros neumáticos; D representa el gripper de la etapa de cerrado, M es el motor de la base donde se situará la botella para las primeras tres etapas, BOM representa la bomba hidráulica, S1 hasta S5 son los sensores de proximidad fotoeléctricos, MP representa el motor a pasos bipolar y A0, A1, B0, B1, CO y C1 son los sensores fin de carrera de los cilindros A, B y C a través de micro-switch; el conjunto formado por m1, m2, m3, m4 y m5 son memorias que se implementaron para el control de las etapas del proceso;

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

BT es el motor eléctrico que impulsa la banda transportadora y por último CAJA es la base giratoria donde se depositarán las botellas al finalizar el proceso.

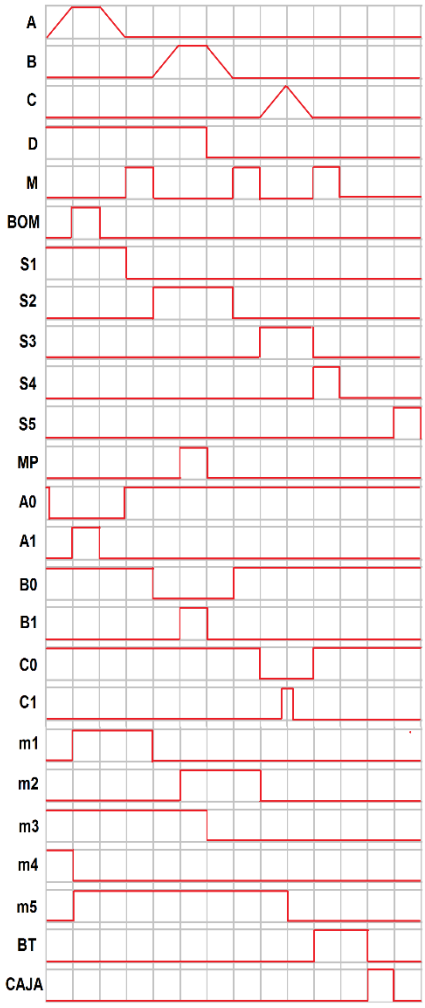


Figura 12. Diagrama espacio-fase del proceso.

Una vez elaborado el diagrama espacio-fase y deducido el sistema de ecuaciones lógicos para activación de actuadores, la elaboración del programa en lenguaje KOP se simplifica, ya que aquellas condiciones que dependan de operaciones AND se trasladan a combinación de contactos normalmente abiertos y cerrados en conexión serie, mientras las condiciones que dependen de operaciones OR son combinación de contactos en conexión paralelo, facilitando la programación de secuencias bajo PLC.

Posteriormente y antes de cargar el programa al PLC se realizó una simulación con la ayuda del software *Automation Studio* con la finalidad de corregir cualquier error que pudiera existir en el diagrama KOP y generar los esquemas eléctricos, electroneumáticos y de control. En la figura 13 se muestras el plano de entradas y salidas digitales del proceso.

Cabe destacar que la automatización se realizó sólo con el PLC inclusive la programación del motor a pasos. La programación del motor a pasos se hizo con a partir de los timers retroalimentados que se utilizó como un generador de pulsos, los cuales recibía un contador ascendente hasta 4 y de ahí se implementaron 5 comparadores para mandar las señales correspondientes al motor dependiendo de que número de señal recibían los comparadores.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

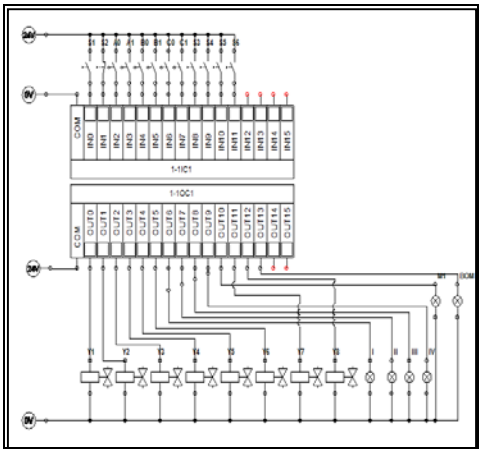


Figura 13. Plano de entradas y salidas digitales.

Una vez simulado el proceso en el software antes mencionado se corrigieron algunos errores que surgieron con las activaciones de la bomba hidráulica y de la base giratoria de la estación de llenado. Posteriormente se procedió a pasar el esquema KOP ahora a la plataforma SIMATIC STEP-7 compatible con el PLC S7-300, ya hecho el esquema KOP en esta plataforma se cargó al PLC para hacer funcionar el sistema y de una manera real. En la figura 14 se muestra un fragmento del programa transferido al PLC.

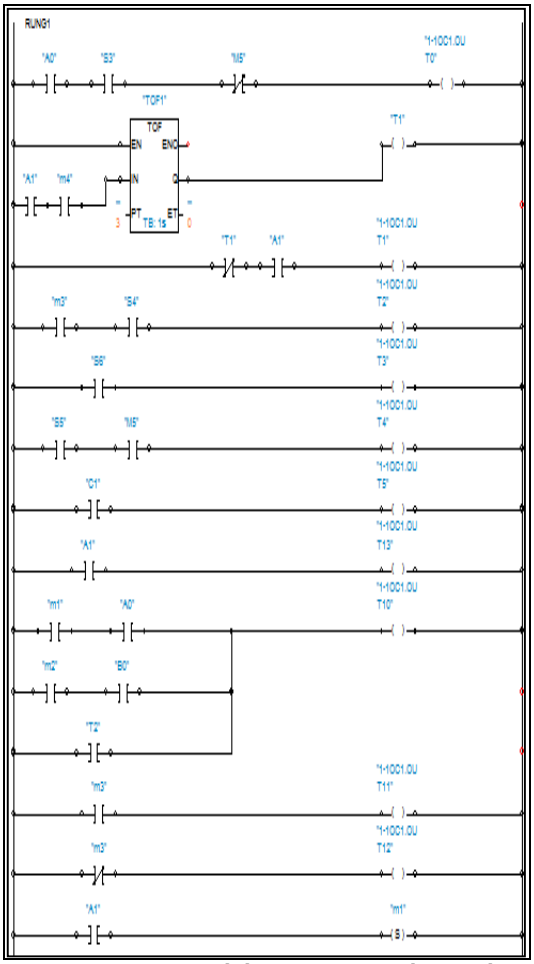


Figura 14. Fragmento del programa en lenguaje KOP.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

6. Resultados

A través de este proyecto se implementó una estación de un proceso de producción alimentario, en forma de un sistema de embotelladora y un sistema de empaquetado. El proceso fue abordado desde la elección de componentes tanto mecánicos, eléctricos y electroneumáticos que estuvieron al alcance de nuestra economía, resolviendo paso a paso las necesidades del proceso para llevar cabo su automatización. A través del cableado correspondiente entre el PLC y el sistema físico se presentaron inconvenientes con los sensores LM393 ya que la luz ambiente modificaba su comportamiento. La iluminación sobre estos sensores debe de ser muy poca y distribuida de una manera uniforme para su correcto funcionamiento. Sin embargo, al resolver estos problemas menores se ejecutó la rutina programada mostrando buenos resultados en su ejecución (figura 15).

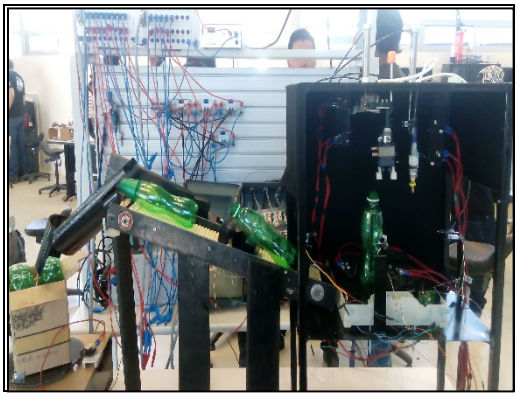


Figura 15. Sistema de embotellado y empaquetado.

El prototipo ya se encuentra en funcionamiento actualmente en el laboratorio de Robótica de la Universidad Politécnica del Bicentenario, cuyo beneficio inmediato es el uso de toda la estructura para nuestro aprendizaje en futuras asignaturas que conlleven tecnologías de control para la automatización de procesos industriales.

7. Conclusiones

Tras la realización de este proyecto queda señalada la importancia de la automatización en los procesos industriales, más específicamente en las celdas de manufactura ya que de esta manera se ahorran muchos recursos de todo tipo a largo plazo, es decir, si minimizan las pérdidas y se maximiza la productividad. Otro punto importante es la distribución de las máquinas que forman la celda de manufactura, estas deben de estar colocadas de forma estratégica para que exista un buen flujo entre todos los procesos involucrados y así aprovechar al máximo la automatización del proceso.

Como trabajo futuro se implementaran tecnologías sobre el prototipo como sensores inductivos y ópticos industriales, además de la inclusión de software para la elaboración de un HMI que nos permita el monitoreo del proceso en tiempo real.

Referencias

[1] Roldan, V. *"Automatismos Industriales",* Editorial Paraninfo, 2008.
[2] Ebel, F., Idler, S., Prede, G., Scholz, D. *"Fundamentos de la técnica de automatización",* Festo Didactic, Alemania, 2007.
[3] Pitarch, P. *"STEP 7: Una Manera Fácil de Programar PLC de Siemens",* Marcombo, 2009.
[4] Millán, S. *"Automatización neumática y electroneumática",* Marcombo, 1995.
[5] *http://senseilean.blogspot.mx/2013/06/lean-manufacturing-celdas-de-manufactura.html.*

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

32. Generación de movimientos del torso de un robot humanoide de arquitectura abierta.

González Trejo José Enrique, López Sandoval Andrés Ernesto, Baliño González Rosa Isela, Rodríguez González Andrea Jaqueline, Reyes Cruz Luis Ángel, Pedraza Ortega Jesús Carlos.

en_gt@hotmail.com

Facultad de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro.
Av. de las Ciencias S/N Campus Juriquilla, Juriquilla, Querétaro, Qro.
C.P. 76230 México. Tel. 1921200 EXT. 5900

Resumen

En el presente trabajo mostramos una estrategia para la generación de movimientos y telecontrol del torso de un robot humanoide de arquitectura abierta el cual se ha desarrollado gracias a la Universidad Autónoma de Querétaro con el apoyo del Fondo de Proyectos Especiales de Rectoría (FOPER).

Con el desarrollo de éste prototipo surgió la necesidad de generar secuencias básicas para el movimiento del robot, con las cuales se puede analizar la mecánica del robot humanoide e implementar funciones como básicas, así como de su manipulación a distancia.

Se utilizó el software de animación Blender, que permitió implementar el análisis cinemático realizado, así como incorporar el modelo CAD del robot y lograr controlarlo en tiempo real mediante la generación de una interfaz robot-Blender.

Palabras clave: Torso Robot Humanoide, Blender, Cinemática, CAD.

1. Introducción

Las interacciones humano-robot han sido motivo de estudio a lo largo de los últimos años, especialmente desde que se visualizó el potencial de la inclusión de los robots en actividades de la vida cotidiana de los seres humanos. Estas interacciones siempre se vieron limitadas debido a una falta de naturalidad en la estructura y, en especial, en los movimientos de los robots, en parte a causa del material de construcción y los componentes electrónicos que involucraban; de igual forma, estos estaban sujetos a procesos de programación complejos y largos, todo lo cual limitaba el rango de posibilidades en las posiciones que podían lograr.

Además la interacción directa entre humano y robot se había realizado hasta ahora por medio de controles que no eran lo suficientemente intuitivos (joysticks, mandos, pulsadores) para generar una correspondencia entre los movimientos humanos y los del robot [1].

El interés en naturalizar los movimientos de los robots se debe en gran parte a la necesidad que se tiene en diferentes campos para que estos puedan realizar movimientos complejos; pero además

para que en campos como la robótica de servicio o la enseñanza estos sean aceptados más rápidamente por los usuarios [2].

La incorporación de los desarrollos de la robótica y la tecnología multimedia han permitido incrementar las capacidades de los sistemas remotos. La telerrobótica y la teleoperación son las áreas de la robótica que se interesan en control y operación de robots a distancia. La telerrobótica es una técnica de teleoperación avanzada, donde el dispositivo maestro puede funcionar de manera automática, y solo requiere la supervisión mínima del operador [3].

Específicamente en el presente trabajo, la teleoperacion se logra mediante la interfaz desarrollada en Blender y una comunicación inalámbrica.

2. Estrategia

El objetivo es desarrollar un método para generar secuencias de movimientos para un prototipo de robot humanoide con arquitectura abierta, basado en el análisis y modelado de la cinemática directa, que permita la libertad de manipular sus articulaciones mediante el software de animación Blender [4] y además, hacer una réplica de la secuencia de movimientos en el prototipo del robot humanoide en tiempo real. La estrategia utilizada se muestra en la figura 1.

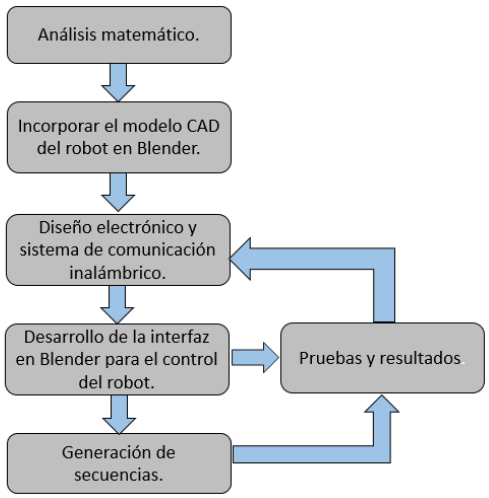


Figura 1. Estrategia propuesta.

De esta manera, se pueden realizar diversas secuencias de movimientos para un posterior análisis que nos permita construir una estrategia de locomoción heurística que sirva como ayuda para trabajos futuros en esta misma rama de la robótica.

2.1 Análisis matemático.

El análisis matemático que se realizó involucra tanto el estudio geométrico como la cinemática directa del torso del robot. El modelo geométrico del robot es la relación entre los valores de las variables asociadas a las articulaciones del robot y la situación (posición y orientación de un sistema de referencia). [5]

Se utilizan las coordenadas homogéneas para representar vectores de posición en un espacio tridimensional, y las matrices de rotación se ampliarán a matrices de transformación homogénea 4 x 4

para incluir las operaciones translacionales del sistema de coordenadas ligado al cuerpo, siendo utilizado por primera vez este método por Denavit-Hartenberg en 1995. [6]

Tal y como se muestra en la figura 3, se asocia un cuadro o sistema de referencia a cada articulación (excepto por {D} y {H} que pertenecen al efecto final), representado por un sistema de coordenadas cartesianas:

- Flecha roja (eje x)
- Flecha verde (eje y)
- Flecha azul (eje z)
- Flecha negra (GDL)

El sistema de referencia base OXYZ se encuentra ubicado en el centro del torso del robot.

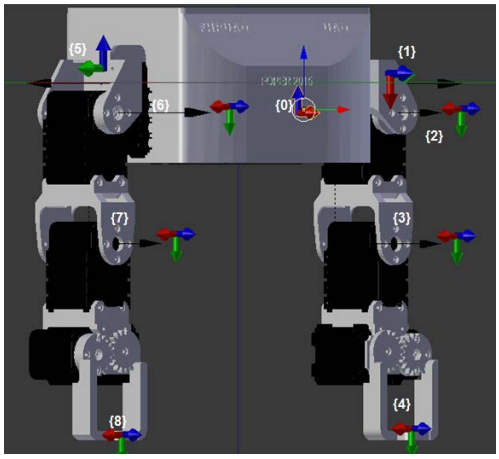


Figura 2. Torso del robot con su sistema de referencia.

Para la solución de la cinemática directa, se obtiene la posición y orientación del efecto final del robot en función de las variables de las articulaciones; se emplearon ecuaciones de transformación homogéneas básicas para resolver la relación entre los eslabones del robot, descrita en la ec. (1) y obtener así una matriz de transformación homogénea compuesta, ec. (3) que relacione el sistema de referencia base con el sistema de referencia de la pinza ${}^{0}A_{4}$.

$$T_{trans\,z}(d_1)\ T_x(-\pi/2)\ T_{trans\,x}(d_2)\ T_x(-\pi/2) * T_{trans\,z}(d_3)\ T_z(-\pi/2)\ T_y(\pi/2+q_1)\ T_z(\pi/2)$$
$$* T_{trans\,z}(d_4)\ T_{trans\,x}(d_5)\ T_x(-\pi/2)\ T_z(-\pi/2+q_2) * T_{trans\,y}(d_6)\ T_z(-\pi/2+q_3)\ T_{trans\,y}(d_6) \quad (1)$$

Las ecuaciones (2.1), (2.2), (2.3), expresan las rotaciones en los ejes (α, Φ, Θ) y la ecuación (2.4) la translación en los ejes (x, y, z):

$$T_{x,\ \alpha}\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & cos\alpha & -sen\alpha & 0\\ 0 & sen\alpha & cos\alpha & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$T_{y,\ \Phi}\begin{bmatrix}cos\Phi & 0 & sen\Phi & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ -sen\Phi & 0 & cos\Phi & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$T_{z,\ \theta}\begin{bmatrix} cos\theta & -sen\theta & 0 & 0 \\ sen\theta & cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

$$T_{trans}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & dx \\ 0 & 1 & 0 & dy \\ 0 & 0 & 1 & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

Dónde:

Tabla 1. Elementos del brazo izquierdo

Elemento	Valor	Elemento	Valor
q_1	θ_1	d_3	*1*
q_2	θ_2	d_4	*-1.4*
q_3	θ_3	d_5	*2.84*
d_1	*-1*	d_6	*6.3*
d_2	*7.5*	d_7	*5.8*

Estos valores están reflejados en la figura 3. Donde los elementos q_i representan GDL. Y los elementos d_i las dimensiones de los eslabones del robot, el cual está conformado por dos brazos articulados y estos a su vez cuentan con 3 eslabones y 3 grados de libertad (q_i(t)).

Al ser simétricos los brazos, los elementos d_i del brazo izquierdo son iguales al derecho excepto por d_9 cambia el signo de d_2, al igual de los q_i.

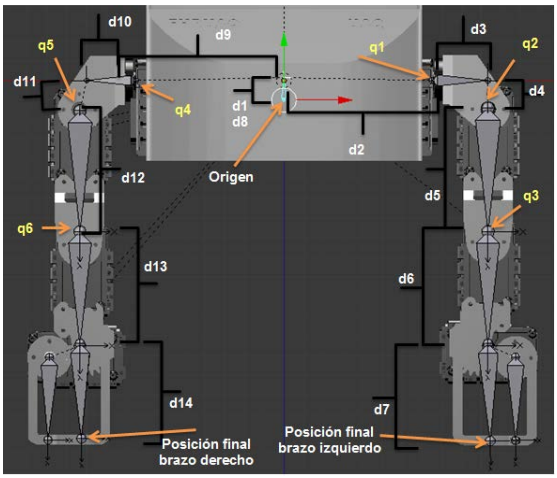


Figura 3. Sistema de referencias de los grados de libertad (GLD) del torso del robot.

Solución de la cinemática directa para el brazo izquierdo:

$$ {}^{0}A_4 = \begin{bmatrix} r_{nx} & r_{ox} & 0 & p_x \\ r_{ny} & r_{oy} & r_{ay} & p_y \\ r_{nz} & r_{oz} & r_{az} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3) $$

Dónde:

$$ r_{nx} = \cos((-\pi/2 + q_2) + (-\pi/2 + q_3)) \quad (4) $$

$$ r_{ox} = \sin((-\pi/2 + q_2) + (-\pi/2 + q_3)) \quad (5) $$

$$ p_x = d_2 + d_5 - d_7 \sin((\pi/2 + q_2) + (\pi/2 + q_3)) \quad (6) $$

$$ r_{ny} = \sin((-\pi/2 + q_2) + (-\pi/2 + q_3)) * \sin(-\pi/2 + q_1) \quad (7) $$

$$ r_{oy} = \cos((-\pi/2 + q_2) + (-\pi/2 + q_3)) * \sin(\pi/2 + q_1) \quad (8) $$

$$ r_{ay} = \cos(\pi/2 + q_1) \quad (9) $$

$$ p_y = \sin(\pi/2 + q_1)(d_7 \cos((-\pi/2 + q_2) + (-\pi/2 + q_3)) - d_4 + d_6 \cos(-\pi/2 + q_2)) \quad (10) $$

$$ r_{nz} = -\sin((-\pi/2 + q_2) + (-\pi/2 + q_3)) * \cos(\pi/2 + q_1) \quad (11) $$

$$ r_{oz} = \cos((-\pi/2 + q_2) + (-\pi/2 + q_3)) * \cos(\pi/2 + q_1) \quad (12) $$

$$ r_{az} = \sin(\pi/2 + q_1) \quad (13) $$

$$ p_x = d_1 + d_3 + d_4 \cos(\pi/2 + q_1) - d_6 \cos(\pi/2 + q_1)\cos(-\pi/2 + q_2) $$
$$ - d_7 \cos(\pi/2 + q_1)\cos(-\pi/2 + q_2) + d_7 \cos(\pi/2 + q_1)\sin(-\pi/2 + q_2) \quad (14) $$
$$ * \sin(-\pi/2 + q_3) $$

q1: 1° grado de libertad del brazo izquierdo.
q2: 2° grado de libertad del brazo izquierdo.
q3: 3° grado de libertad del brazo izquierdo.

Para la solución de la cinemática directa del brazo derecho se emplea la misma ecuación con las respectivas variables de cada brazo, debido a que son simétricos.

2.2 Incorporar el modelo CAD en Blender.

Esta parte del proyecto consiste en digitalizar el torso del robot humanoide en un software CAD (Solidworks) [7] para posteriormente ser incorporado en el entorno gráfico de Blender, realizando las configuraciones adecuadas (agregando un esqueleto empleado en la animación de personajes en Blender con la orientación descrita en la Figura 3) para que cada una de las articulaciones reproduzca de manera similar los movimientos del modelo real (los huesos del robot forman los eslabones del cuerpo de éste y la cabeza del hueso forma la articulación). Es necesario tener el modelo del robot como archivo .stl, .obj o una extensión similar para que pueda ser incorporado en el entorno de trabajo de Blender, con la mayor precisión al modelo real del robot.

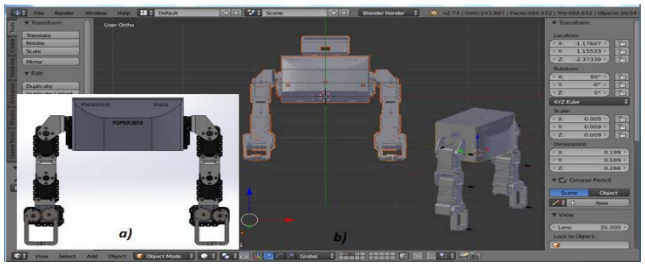


Figura 4. a) Diseño del torso en Solidwoks. b) Incorporación del diseño a Blender.

La API (Application Programming Interfaces) que incorpora Blender, permite al usuario interactuar con el contenido de la aplicación en tiempo real, así como también la posibilidad de ejecutar e implementar scripts y comandos en el lenguaje de programación Python, de esta forma es posible gestionar y establecer una comunicación con otro software o sistema que se requiera mediante Middleware (lógica de intercambio de información entre aplicaciones).

Por lo tanto el entorno de Blender cuenta con los componentes y elementos necesarios para desarrollar un sistema de comunicación inalámbrico que permita la comunicación entre la interfaz del modelo gráfico y el sistema real, teniendo como resultado un sistema de telecontrol de un robot.

2.3 Diseño electrónico y sistema de comunicación inalámbrico.

Una vez finalizado el análisis teórico del torso del robot humanoide se desarrolla el sistema electrónico y de alimentación para el control de los servomotores (Dynamixel AX-12) [8] y el sistema embebido utilizado (BeagleBone Black) [9], como se muestra en la figura 5, así como el sistema de comunicación inalámbrica para el robot humanoide y el área de control empleando el protocolo 802.11.

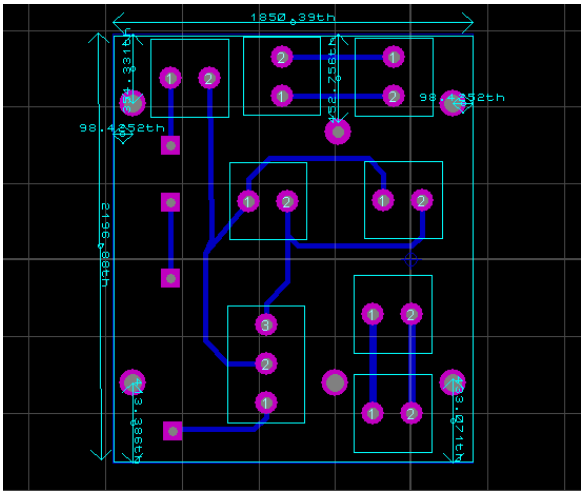


Figura 5. Circuito realizado en Proteus para la alimentación de los servomotores y la BeagleBone Black.

2.4 Desarrollo de la interfaz en Blender para el control del robot.

Los principios básicos para el modelo y simulación de la cinemática de un robot son también empleados en la animación por computadora al describir la orientación y posición de cada uno de los objetos de una escena en un sistema de coordenadas de referencia, [10] siendo en este caso un sistema de coordenadas (x, y, z). Por lo cual el motor gráfico 3D de Blender, en conjunto con sus herramientas de animación y modelado 3D permiten el desarrollo de una interfaz de telecontrol que incorpore el modelo digitalizado de un robot y una estación de telecontrol.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

La interfaz de Blender consiste en una interfaz que muestra el torso del robot humanoide y el ángulo en el que se encuentra posicionada cada articulación (servomotor) como se puede apreciar en la Figura 7. Esta interfaz al ser ejecutada, envía un mensaje al robot para establecer una comunicación cliente-servidor.

El programa desarrollado en Python, que funciona como servidor en la tarjeta BeagleBone Black se encarga de enviarle las instrucciones a los servomotores. Estas instrucciones son enviadas por la interfaz de Blender que se activan al presionar una tecla, como se muestra en la tabla 2. Estos comandos son enviados mediante sockets. El diagrama de flujo del programa servidor se muestra en la figura 6.

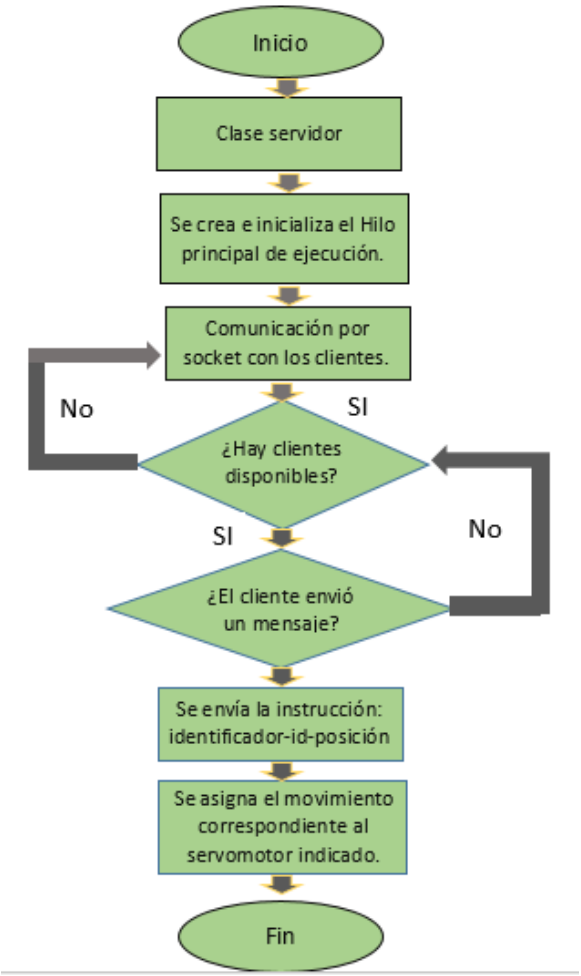


Figura 6. Diagrama de flujo programa servidor en la BeagleBone Black.

2.5 Generación de secuencias

La interfaz de Blender en modo de animación permite realizar secuencias de movimientos de los brazos del robot, cambiando el ángulo de rotación de los grados de libertad con los que cuenta el robot (como si fuera un simulador), esto nos permite realizar las pruebas para definir las limitaciones y alcances de los movimientos del robot. Una vez establecidos, se puede recrear o realizar la manipulación en tiempo real mediante el motor de videojuegos de Blender (Blender Game Engine).

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Cada uno de los servomotores con los que cuenta el robot, tienen un rango de rotación entre 0° – 300°, la posición por de default es de 150° permitiendo rotarla 150° hacia ambos sentidos.

Tabla 2. Comandos para manipular el robot mediante Blender.

Comando	Instrucción	Comando	Instrucción
Q	$q_1 += 10°$	T	$q_4 += 10°$
A	$q_1 -= 10°$	G	$q_4 -= 10°$
W	$q_2 += 10°$	Y	$q_5 += 10°$
S	$q_2 -= 10°$	H	$q_5 -= 10°$
E	$q_3 += 10°$	U	$q_6 += 10°$
D	$q_3 -= 10°$	J	$q_6 -= 10°$
R	$tenaza_{izq} += 10°$	I	$tenaza_{der} += 10°$
D	$tenaza_{izq} -= 10°$	K	$tenaza_{der} -= 10°$

2.6 Pruebas y resultados.

La última etapa del proyecto consistió en realizar pruebas del sistema de telecontrol completo, es decir, se realizaron las pruebas de telemando manipulando las articulaciones del robot humanoide a través de la interfaz desarrollada en BGE, comprobando la réplica de los movimientos del sistema esclavo-maestro así como el análisis del sistema de comunicación, determinando las posibles mejoras para el sistema y la interfaz de telecontrol para un trabajo futuro.

.

3. Análisis de resultados

En la figura 7 podemos observar las pruebas que se realizaron con la interfaz en Blender funcionando y con la parte del torso del robot humanoide, que cuenta con 4 grados de libertad por brazo y replicalos movimientos que se le van asignando en la animación en Blender, como podemos notar.

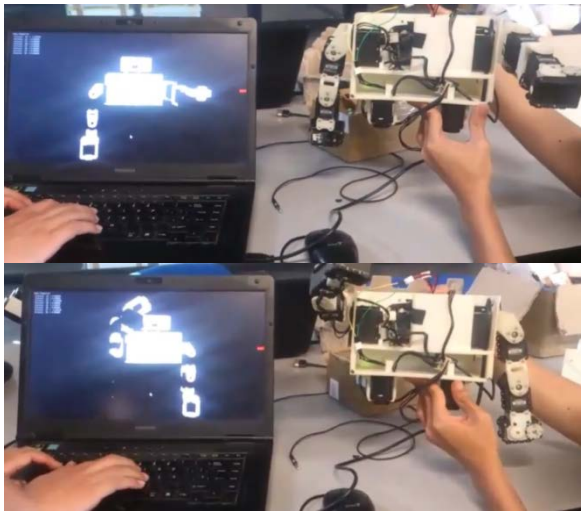


Figura 7. Pruebas con la comunicación entre la interfaz en Blender con el torso del robot

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

4. Conclusiones

Con ayuda de la interfaz desarrollada en Blender, se han generado secuencias de movimiento en el torso del robot previamente simulado en el software de animación, así como también se hizo uso de comunicación en tiempo real para generar movimientos en el mismo. La comunicación se realizó mediante una función implementando sockets, en la cual la interfaz en Blender trabaja como cliente y la tarjeta de desarrollo como servidor.

Referencias

[1] C.I. Penaloza,Y. Mae, K. Ohara, and T. Arai, “Social human behavior modeling for robot imitation learning”, Mechatronics and Automation (ICMA), 2012 International Conference on , vol., no. , pp. 457-462, Agosto. 5, 2012.

[2] S. Hak, N. Mansard, O. Ramos, L. Saab, and O.Stasse, “Capture, recognition and imitation of anthropomorphic motion”, Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on , vol., no., pp. 3539-3540. Mayo 1, 2012.

[3] Turner, M. L., Findley, R. P., Griffin, W. B., Cutkosky, M. R., & Gomez, D. H. 2000. Development and testing of a telemanipulation system with arm and hand motion. In ASME IMECE Symp. on Haptic Interfaces..

[4] Blender Foundation. (1995). Información técnica. Agosto 20, 2015, de Blender, Sitio web: https://www.blender.org/.

[5] Fu, K. S. (1988). Robótica, Control, detección, visión e inteligencia. McGraw-Hill Interamericana de España

[6] Martínez, V. J. & Sabater, N. J. M. (2012). Guía Docente para el Diseño de Robots de Servicio. Madrid, España.

[7] Dassault Systèmes SolidWorks Corp. (1993). Consulta general. Agosto 21, 2015, de SolidWorks Sitio web: http://www.solidworks.es/sw/183_ESN_HTML.htm

[8] ROBOTIS. (1999). Consulta técnica servomotores Dynamixel AX-12, AX-18. Agosto 19, 2015, de ROBOTIS Sitio web: http://en.robotis.com/index/

[9] The BeagleBoard.org Foundation. (2013). Consulta técnica. Agosto 20, 2015, de Texas Instruments Sitio web: http://beagleboard.org/

[10] Bruyninckx, H. 2004. Blender for robotics and robotics for Blender. Dept. of Mechanical Engineering. KU Leuven, Belgium.

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

33. Control de un motor trifásico para aplicaciones industriales vía Wi-fi

López Carrasco Miguel Ángel, Pérez Leal Antonio Javier, Ramos Aviña Irving Fabián, Aguilar Anastacio José Carlos A

Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, División de Mecatrónica e Industrial.
Av. Tecnológico S/n, Esq. Av. Carlos Hank Gonzáles. Col. Valle de Anáhuac, Ecatepec de Morelos. Estado de México, CP. 55210. Tel.50002330. Mail: jcaaa72@yahoo.com.mx

Resumen

El presente trabajo describe la aplicación de tecnologías de comunicación vía Wi-fi, con el propósito de controlar a voluntad del operador un motor con alimentación trifásica, dado que suministra alto torque en la industria de procesos, fabricación y manipulación de materia prima. El control entre el usuario y la máquina se llevará a cabo mediante la comunicación vía internet de forma inalámbrica o Wi-fi, lo que nos permite un control en tiempo real sin necesidad de estar en el lugar preciso donde se encuentra dicha máquina, es decir el operador puede estar en algún lugar a una distancia a más de 10km, manipulando y monitoreando el comportamiento de la máquina, la monitorización se lleva acabo con una cámara IP.

La contribución de este documento es mostrar la realización de un sistema de control vía internet con la implementación de la Wi fi para el control de máquinas eléctricas con los recurso que actualmente se tienen de forma libre en software como Arduino y Android.

Una de las ventajas que ofrece este tipo de control es la manipulación a distancia de máquinas eléctricas en ambientes de alto riesgo para el operador.

Palabras clave: Motor Trifásico, Comunicación Wi-fi, modulación de ancho de pulso, Ethernet, Tiempo Real, Arduino, Android.

1. Introducción

En la actualidad toda industrias de fabricación, manipulación, transportación de materia prima, así como elevadores, grúas, bombas, etc. Cuenta con motores eléctricos para realizar dichas acciones, particularmente motores trifásicos ya que tienen alto torque y bajo consumo de corriente, su eficiencia ronda en un 75% al 85%, además tienen la ventaja de invertir el giro, por lo que estás cualidades lo hacen ideal para aplicaciones industriales.[1].

Con la implementación de dispositivos de control de estado sólido y las nuevas tecnologías de programación como Arduino y el software de descarga libre como Android, se pueden lograr aplicaciones complejas como la transmisión de datos vía Wi-fi a bajo costo, en comparación con sistemas de National Instruments, Texas Instruments, Siemens, etc. En dónde los costos para la adquisición de tales sistemas de transmisión de datos y monitorización son muy elevados.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Una de las ventajas que ofrece el control vía Wi-fi es su amplio potencial en la utilización en cuanto a sistemas de control se refieren, ya que se puede controlar sistemas desde los más sencillos a los más complejos, desde cualquier lugar, siempre y cuando se cuente con una conexión de red inalámbrica. Una vez conectado, el control se puede realizar a larga distancia incluso en cualquier punto de la república o en el mundo, considerando que la máquina a controlar o sistema se encuentre en una zona de internet inalámbrica y se tenga una tarjeta de conexión Wi-fi dentro del circuito del control de la máquina o sistema. Las prestaciones que se tienen son mayores en cuestión de alcance, en comparación con los sistemas de radio frecuencia analógicos, infrarrojo, Bluetooth, etc. Por ejemplo la aplicación de control inalámbrica vía Bluetooth, tienen un rango de transmisión de 30 a 50 m, en línea recta sin obstáculos, se han vuelto más cotidianas en cuanto a transmisión de datos y económicos.

Este tipo de sistemas de control inalámbrico son de gran ayuda para aquellos lugares donde se manipulan residuos peligrosos, gases o que ponga en riesgo la vida del usuario a cargo del control del sistema o monitorización. Otra de las ventajas que ofrece este proyecto, es que el usuario pueda estar al otro lado del mundo monitoreando el proceso en cualquier momento con la ayuda de cámaras de tipo IP. A demás se reducen costos de materiales, ya que se ahorra el tendido e instalación de cableado y tableros de control.

2. Desarrollo del Proyecto

Para el desarrollo del proyecto se utiliza como dispositivo de comunicación el módulo Wifly RN-XV de Roving Networks. Es una solución Wi-fi certificada, especialmente diseñada para clientes que quieren migrar sus redes actuales con arquitectura 802.15.4 a una plataforma estándar TCP/IP, sin tener que rediseñar su hardware actual. Cuenta con un procesador de 32bits, stack TCP/IP, reloj de tiempo real, acelerador criptográfico, unidad de manejo de energía y una unidad de manejo de sensores analógicos (sensor de humedad y sensor de temperatura). El módulo viene precargado para simplificar la integración y minimizar el tiempo de desarrollo para su aplicación. La configuración que utilizaremos es la más simple, el hardware solo requiere 4 conexiones (VCC, TX, RX y GND) para alimentar el modulo y crear una conexión inalámbrica de datos. Se utilizará el software libre **Tera Term**, ya que este es un emulador de comunicación, es compatible con telnet, SSH 1 y 2, conexiones de puerto serie. En la figura 1, se muestra el icono de dicho programa.

Figura 1. Icono del Programa Tera Term.

Este programa es utilizado para la configuración del módulo Wifly RN-XV de Roving Networks mostrada en la figura 2. En dicho software accederemos a la configuración del módulo, para dar de alta una dirección IP para la posterior conexión, conectar el modulo a una red de internet inalámbrico y configurar las salidas al microcontrolador.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Figura 2. Módulo Wifly RN-XV.

2.1 Configuración del Módulo Wifly

1. Accederemos a la aplicación Tera Term en nuestro ordenador, declararemos el comando signo de pesos ($) 3 veces
2. El software nos mandara un una pantalla conocida como CMD como contestación, como se puede observar en la figura 3.
3. Declararemos en comando “set w s SSID” para asignar el modem al que tendrá acceso.
4. El siguiente comando “set w p CLAVE WPA” con este comando pondremos la clave de red.
5. Save.
6. Reboot.
7. Declaramos el comando “set i a” este comando declaramos la IP estática que asignemos; Ejemplo: “set i a 192.165.1.65”
8. Se declara “set i d 0” para cerrar el dhcp estático que tiene por default y se asigna la dirección MAC 255.255.255: 1
9. Save.
10. Reboot.
11. Con la siguiente configuración ya se tiene asignada un IP estática ya que el modem no asigna la IP para nuestro módulo Wifly.

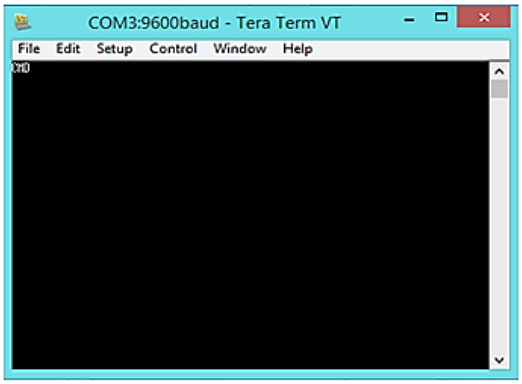


Figura 3. Acceder al CMD del Módulo.

2.2 Proceso para conectar el Módulo a una red Wi-fi

1. Accederemos a la aplicación Tera Term en nuestro ordenador.
2. Insertaremos en el apartado de Host, el IP de nuestro modulo.
3. En el apartado de Service seleccionaremos SSH.
4. El puerto TCP será el número 22, (Este puerto lo manda el modulo por default). Como se observa en la figura 4.
5. Realizada la conexión, accederemos al CMD del modulo con 3 signos de pesos ($)

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

6. Insertamos el comando “set ip dhcp 1”, para disponer de una dirección IP de manera automática.
7. Agregamos el comando “set ip protocol 2”, para configurar el uso del protocolo IP.
8. Insertamos el comando “set wlan join 0”,para que el Wifly deje de intentar conectarse automáticamente como lo hacía al principio.
9. El siguiente comando “set wlan phrase”, es utilizado para configurarla clave WAP o WAP2, si nuestra red es WEP usaremos "set wlankey".
10. Por ultimo insertamos el comando “Join”, un espacio y el nombre de la Red de internet a la que se quiere accesar, con esté comando ejecutamos "join SSID" para conectarnos a la red.

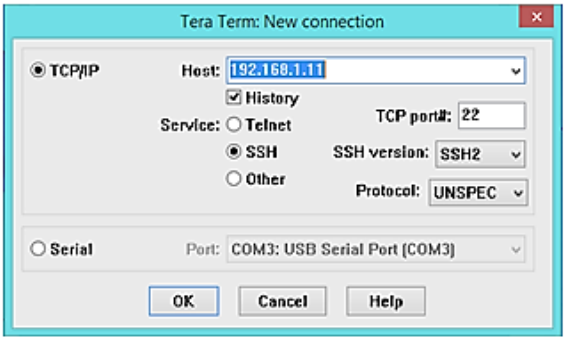


Figura 4. Insertar Host, Puerto TCP y seleccionar el SSH Servie.

En la figura 5, se observa el orden de los comandos que se fueron introduciendo previamente, para la configuración del Wifly, con la aplicación Tera Tem.

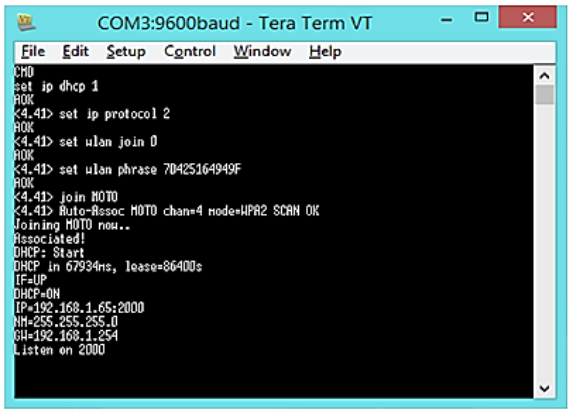


Figura 5. Código de configuración del módulo Wifly para la conexión a internet.

2.3 Control del módulo Wifly con Arduino

Para el control de la transmisión de datos con la tarjeta Wifly, es necesaria la aplicación de paga **Arduino Wi-fi Ethernet Automation,** para dispositivos Android. Esta aplicación transfiere datos hacia el módulo Wifly, por medio de un shield, a un microcontrolador Arduino Uno, figura 6,con el cual se crea la interfaz para recibir la señal inalámbrica de internet por el módulo Wi-fi, parte primordial para iniciar el enlace entre el transmisor-receptor (TX y RX), y el vínculo utilizado para enviar los datos provenientes de una tableta o teléfono celular. Estos datos se interpretarán en un programa cargado en el microcontrolador, de tal manera que se traducen en varios comandos de control para ser enviados como señales de salida a la etapa de potencia. Cabe mencionar que la configuración del módulo Wifly, se efectúa con lenguaje de programación en C para Arduino Uno, donde se tienen todos los códigos, librerías y parámetros necesarios para el control del flujo de datos en la recepción y detección enviados

desde la aplicación hacia dicho modulo, de acuerdo a la interpretación de los datos se enviara a la salida un comando diferente hacia la etapa de potencia y con ello, controlar la velocidad, la dirección del giro e incluso el paro de la maquina eléctrica.

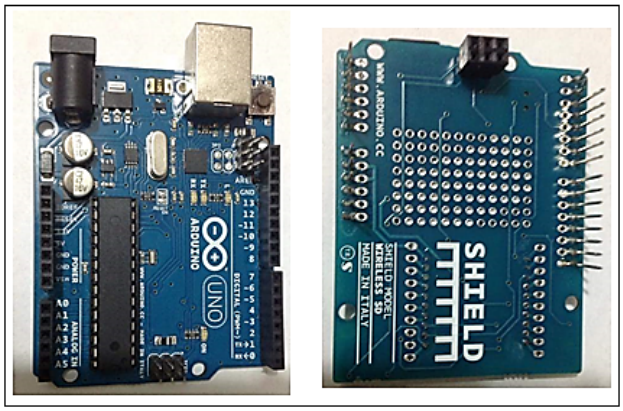


Figura 6. Arduino Uno y Shield para la Wifly.

2.4 Aplicación Arduino Wi-fi Ethernet para el control de la máquina

Como todo control o manipulación de una máquina eléctrica, es necesario tener un panel de control, en nuestro caso se utilizó la aplicación **Arduino Wi-fi Ethernet Automation**ya que nos permite enlazar el módulo Wifly con el teléfono inalámbricamente vía internet y enviar diferentes datos desde el dispositivo al módulo como se muestra en la figura 7, se puede apreciar que dicha aplicación se compone de diferentes botones tanto analógicos como digitales (cinco analógicos y cinco digitales), que puede configurarse como entradas y salidas para realizar diferentes acciones.[2][3]

Para el proyecto se utilizaron, por lo menos cuatro botones digitales mientras que los restantes se deshabilitan. Los configurados para cada acción del motor trifásico son los siguientes:

D2= Paro de la Máquina
D3= Inicia Sentido a la Derecha
D4=Inicia Sentido a la Derecha
D5= Freno Máquina

Los datos recibidos e interpretados por el modulo son de tipo serial RS232, a una velocidad de transmisión de 9600Baudios, configurados para que sean transferidos por los puertos TX y RX del módulo al microcontrolador por medio del shield que convertirá los datos en pulsos y los pulsos se mandaran a la etapa de potencia, controlando la activación y desactivación de componentes electrónicos llamados TRIAC´s. Dichos dispositivos controlan el arranque y el cambio de giro del motor. Con un comando activaremos un dispositivo electromecánico que permita el frenado del motor.

Es importante hacer mención que el módulo Wi-fi, el teléfono móvil y la computadora deben estar conectados a una misma red de internet.

Figura 7. Arduino Uno y Shield para la Wifly.

2.5 Etapa de potencia

La etapa de potencia se construye a partir de circuitos optoacopladores del tipo MOC3081, ya que tienen características importantes, su función principal es crear la interfaz entre la etapa de control con la etapa de potencia (triacs), es decir es un dispositivo acondicionador de señal que comunica al microcontrolador con el motor de CA, de esta manera se protege el circuito de control dé algún corto o alguna variación de corriente por el lado de la potencia, cada fase del motor está conectada a un triac el cual recibe una señal modulada por el lado del gate proporcionada por el microcontrolador.

Para manipular las tres fases es necesario utilizar dispositivos de estado sólido como los TRIAC BTA16-600B, los cuales son activados por los MOC 3081 previamente mencionados.

De la tarjeta Arduino tomamos un bit como salida, que se conectará a tres configuraciones de optoacopladores, como el que se muestra en la figura 8, cada uno controlará una fase independiente, para el motor, de acuerdo a la señal generada en el microcontrolador, la señal proveniente del microcontrolador se introduce por la resistencia que protege al diodo emisor de luz interno de cada optoacoplador. Con este tipo de conexiones logramos mantener un control simple como el ON-OFF hasta un control por Modulación de Ancho de Pulso (PWM) ampliamente utilizado para variar la velocidad de la máquina eléctrica.

En cuanto los TRIACS de potencia, son manipulados por los optoacopladores para permitir el flujo de la corriente alterna por cada fase de 127V y un ángulo entre fases de 120°. Si la señal del comando dado por el microcontrolador es un pulso, este provocara un encendido del motor a plena carga, es decir solamente se está activando a cada uno de los triacs al mismo tiempo.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

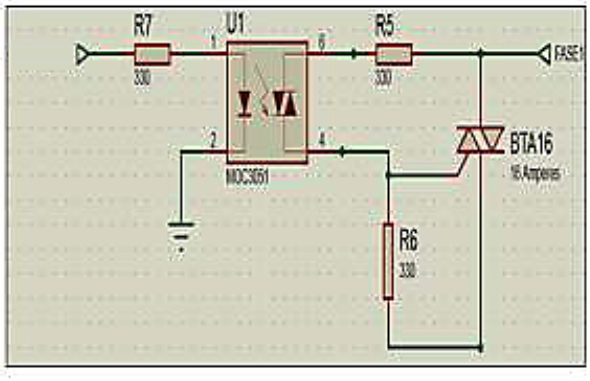


Figura 8. Configuración del Optoacoplador para un TRIAC [8].

Existen diferentes técnicas de variación de velocidad para nuestro caso se utiliza la técnica de modulación de ancho de pulso senoidal (SPWM) donde se hace variar el ancho de cada pulso en proporción con la amplitud de una onda senoidal evaluada en el centro del mismo. Las ventajas de este método es que el factor de distorsión (DF) y las armónicas de orden bajo (LOH), se reducen considerablemente. Las señales de control, se pueden apreciar en la figura 9, donde se generan comparando parte de la onda senoidal vr (t) = Vr.Sen(wt), como señal de referencia con una onda portadora triangular de frecuencia Fc, mientras que la frecuencia de señal de referencia Fr, determina la frecuencia Fo de la señal de salida y la amplitud pico Ar, de esta forma se controla el índice de modulación (M) y en consecuencia el voltaje RMS de salida (Vo).[4][5][6]

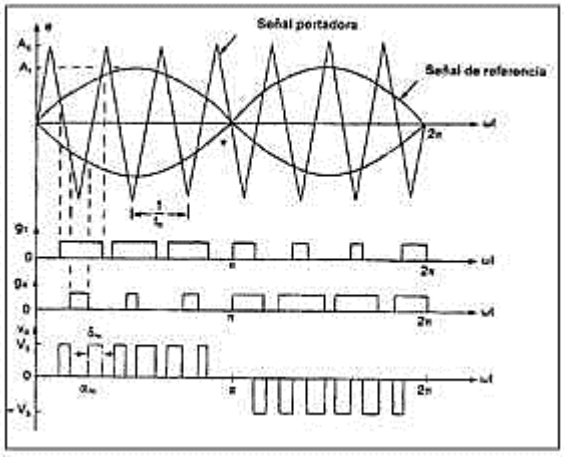


Figura 9. Modulación de ancho de pulso Senoidal.

La variación del voltaje de salida se realiza variando el índice de modulación de amplitud (M)

$$M = \frac{Ar}{Ac} \tag{1}$$

Si ðm es el ancho del m-ésimo pulso, entonces se tiene que el voltaje de salida por cada fase con respecto al punto común: []

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

$$Vo=Vs\left(\sum_{m=1}^{2p}\frac{\delta m}{\pi}\right)^{1/2} \quad (2)$$

Para el cambio de giro del motor es necesario utilizar dos bits del microcontrolador ya que se requiere de dos relevadores para el control del giro del motor trifásico figura 10, muestra el circuito realizado para tal efecto. [5]

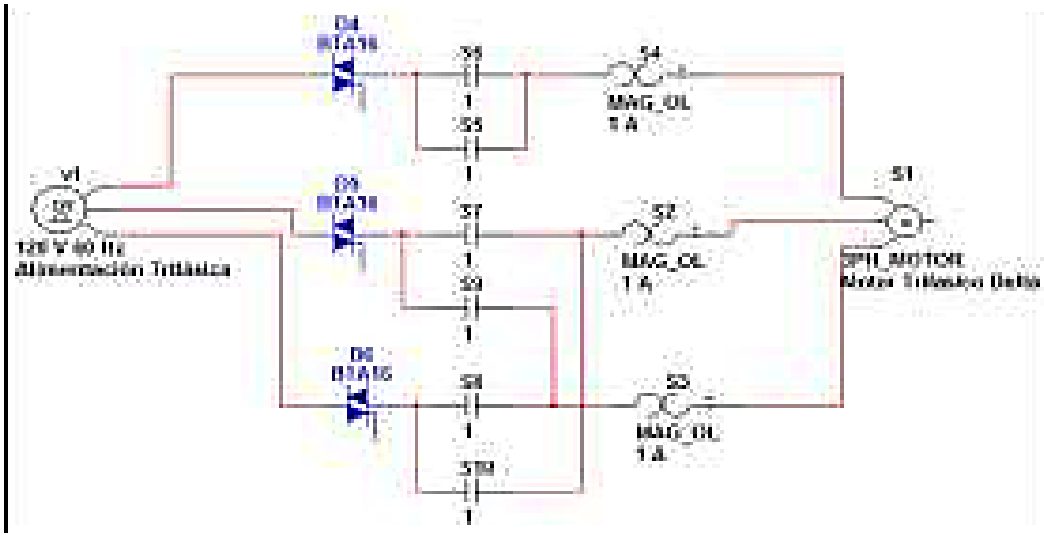


Figura 10. Circuito de inversión de giro con relevadores [5].

2.6 Modelo del motor trifásico

Los motores de inducción trifásica tienen la característica principal de trabajar con la velocidad de sincronía que se define como **Ns** igual a la frecuencia por 120 entre el número de polos con el que cuenta el motor trifásico, otro concepto fundamental es el deslizamiento que se define como la diferencia entre la velocidad de sincronía y la velocidad del rotor **Nr,** entre la velocidad de sincronía ecuación (3).

$$S=\frac{Ns-Nr}{Ns} \quad (3)$$

Si el rotor se encuentra en reposo (sin movimiento) se tiene que **S**=1 y cuando el motor se encuentra en vacío sin carga el valor de **S** tiende a 0, por lo que la velocidad del rotor se obtiene mediante la ecuación (4).

$$Nr=(1-s)Ns \quad (4)$$

La mayoría de los motores de inducción trabajan con valores de deslizamiento que cumplen con la condición S=5%, lo que indica que el margen de valores del deslizamiento se restringe.

El campo magnético rotatorio trifásico se puede analizar a través del estudio de un sistema balanceado, con corrientes desfasadas eléctricamente 120 grados. Tomando en cuenta que la fuerza magnetomotriz generada por cada una de las fases mostradas en las ecuaciones (5)

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

$$\begin{aligned} &Va=Kia(t)Cos(\theta) \\ &Vb=Kib(t)Cos(\theta-120) \\ &Vc=Kic(t)Cos(\theta-240) \end{aligned} \quad (5)$$

Las fases se conectan al motor trifásico de acuerdo a las configuraciones seleccionadas como puede ser tipo estrella o delta. La corriente demandada por la máquina en configuración estrella se expresa con la ecuación (6).

$$I_Y = \frac{\frac{V_{linea}}{\sqrt{3}}}{Z} \quad (6)$$

El par de arranque en una conexión estrella se puede definir con la ecuación (7), que representa el par que desarrolla el motor cuando arranca.

$$T_{(\text{arranque-Y})} = \frac{3Rr(I_{r-arranque-Y})^2}{\omega_s} \quad (7)$$

Para el sistema Delta, empleando las leyes de circuitos eléctricos se tiene que el valor de la corriente en delta se expresa de acuerdo a la ecuación (8).

$$I_\Delta = \sqrt{3}\frac{V_{linea}}{Z} \quad (8)$$

Por lo tanto el par de arranque se define para una maquina en configuración delta mediante la ecuación (9).

$$T_{(\text{arranque-}\Delta)} = \frac{3Rr}{\omega s}\left[\frac{I_{r-arranque-\Delta}}{\sqrt{3}}\right]^2 \quad (9)$$

Por lo que se deduce que un arranque en estrella consume una corriente menor, lo que refleja un par menor en el arranque, tomando en cuenta la carga que se manipula con la máquina produciendo una respuesta Los motores de inducción dependen de la inducción de voltaje y corrientes en el circuito del rotor desde el circuito del estator (acción transformadora). [7]

Los motores de inducción dependen de la inducción de voltaje y corrientes en el circuito del rotor desde el circuito del estator (acción transformadora), dado que la inducción de voltajes y corrientes en el circuito del rotor de un motor trifásico es una operación de transformador, el circuito equivalente de un motor de inducción por lo tanto es similar a un transformador. Puesto que un motor de inducción no tiene un circuito de campo independiente, su modelo no contiene una fuente de voltaje interna como el voltaje interno generado $\mathbf{E_A}$ en las máquinas síncronas. El modelo de un motor de inducción se desarrolla a partir del modelo del transformador. En la figura 11, se muestra un circuito equivalente de transformador por cada fase, lo cual representa un motor de inducción. Como cualquier transformador existe resistencia y auto inductancia en los devanados primarios (estator), que representan el circuito equivalente de la máquina. La resistencia del estator se llama R1 y la reactancia de dispersión del estator X1. Estos dos componentes se pueden ver en el modelo del motor. Como cualquier máquina con núcleo de hierro, el flujo en la máquina se relaciona con la integral del voltaje aplicado E1. El voltaje primario interno del estator E1 se acopla al secundario $\mathbf{E_R}$ por medio de un transformador ideal con una

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

relación efectiva de vueltas $\mathbf{a_{ef}}$. Cuando se aplica voltaje a los devanados del estator del motor de inducción, se induce un voltaje en los devanados del rotor de la máquina. En general, mientras mayor sea el movimiento relativo entre los campos magnéticos del rotor y del estator, mayor será el voltaje resultante del rotor y la frecuencia del rotor.

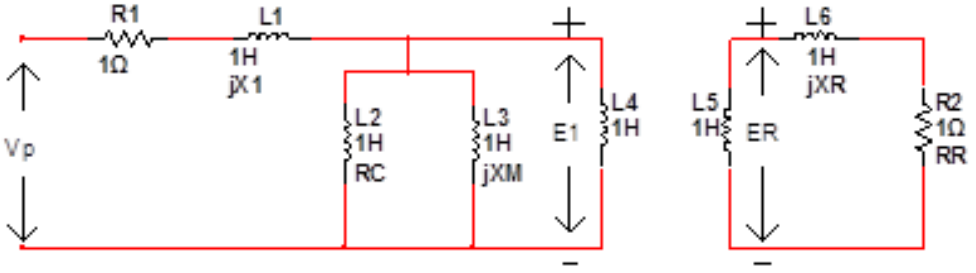


Figura 11. Modelo de transformador de un motor de inducción, con el rotor y estator conectados por un transformador ideal con una relación de vueltas de a_{ef}

El circuito del rotor se muestra en la figura 12, donde se aprecia que la resistencia del rotor **RR** es constante, independiente mente del deslizamiento, mientras que la reactancia del rotor se ve afectada por el deslizamiento, la magnitud y la frecuencia del voltaje inducido en el rotor en cualquier velocidad entre estos dos extremos es directamente proporcional al deslizamiento del motor, por lo tanto, si se llama ER0 a la magnitud del voltaje inducido del rotor en condiciones de rotor bloqueado la magnitud del voltaje inducido con cualquier deslizamiento está dada por la ecuación (10). [4][7]

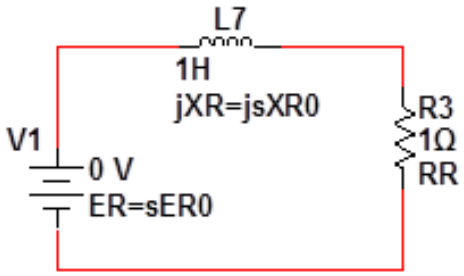


Figura 12. Modelo de circuito de rotor de un motor de inducción.

$$E_R = sER0 \tag{10}$$

Y la frecuencia del voltaje inducido con cualquier deslizamiento está dada por la siguiente ecuación (11).

$$f_r = sf_e \tag{11}$$

2.7 Freno del motor

El freno del motor se puede realizar con diferentes técnicas que pueden ser a partir de elementos mecánicos o elementos eléctricos, en este proyecto se pretende que el frenado se realice con elementos mecánicos como por ejemplo el usos de algún pistón eléctrico y un disco colocado en la flecha del motor para que el freno se realice por la acción de la presión ejercida del pistón hacia el disco, utilizando el principio de la balata, este efecto se debe de realizar previamente con la desconexión de la energía

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

eléctrica del motor, en la figura 13, se puede observar el motor con disco y pistón para el efecto de frenado.

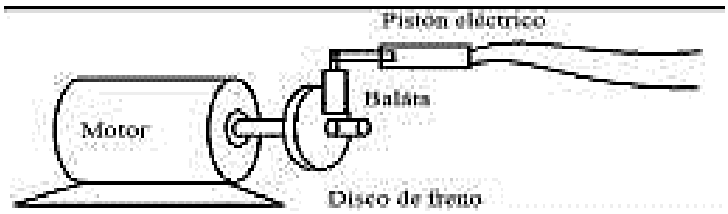


Figura 13. Freno de motor con disco y pistón.

3. Resultados

Los resultados obtenidos del proyecto hasta este momento para este artículo se muestran en las figuras 14 y 15.

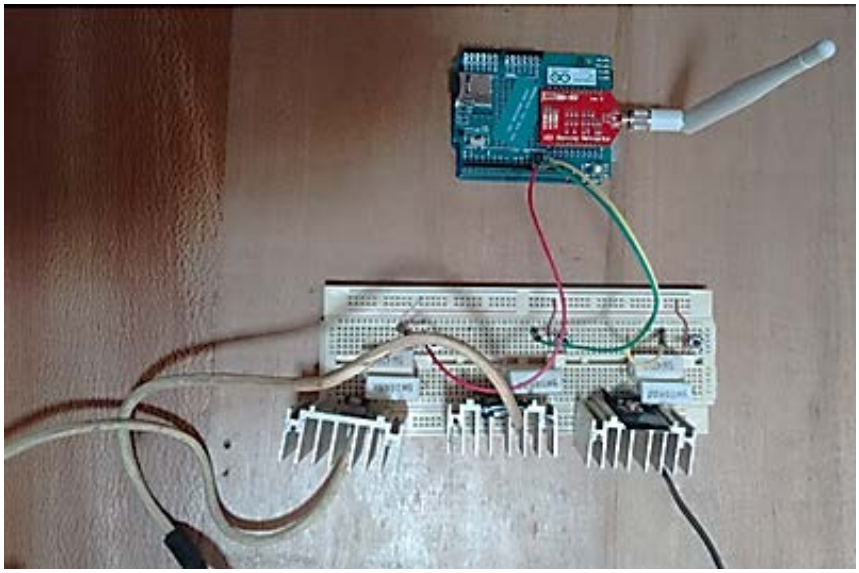


Figura 14. Etapa de Potencia, Arduino y módulo Wi-fi.

Se ha logrado controlar el motor a plena carga, con lo que uno de los objetivos primordiales que se propuso, es la manipulación del motor trifásico a voluntad del operador desde cualquier distancia, a partir del dispositivo móvil, sin la implementación de software sofisticado y sin la utilidad de tarjetas de control o licencias de algún tipo. El control hasta el momento se considera como control ON-OFF, solamente se activa por medio de tres bits: el primer bit es el giro a la derecha, segundo bit giro a la izquierda y tercer bit paro total, los niveles lógicos que se transmiten son ceros y unos, lo que solamente activa a los Triacs para permitir que las fases se conecten o desconecten. La capacidad del motor trifásico que se puede gobernar con esta tarjeta electrónica es hasta 1HP, a 127volts, con una demanda de corriente de 6 a 7 Amperes en vacío incrementando el valor de la corriente a medida que se le conecte una carga. Tomando en cuenta que al momento de conectar el motor existe una demanda considerable de corriente alrededor de 12 a 15 amperes. La eficiencia en este tipo de control se encuentra entre un 75% a 85%.

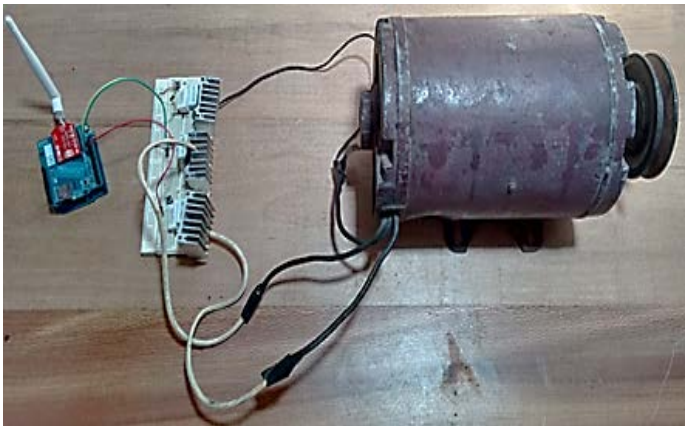


Figura 15. Proyecto Completo Modulo Wi-fi, Arduino y Etapa de Potencia.

4. Conclusiones

Las prestaciones que hoy en día nos ofrece los dispositivos de estado sólido o elementos de potencia, como los tiristores para el control de corriente desde valores del orden de miliamperes hasta valores en el orden de kilo Amperes han sido clave para la modernización continua de los diferentes sistemas de control desde un control ON-OFF hasta un control PID o control moderno. Quedando en la historia el control por relevadores o interruptores. Por otro lado cada día los sistemas de comunicación se vuelven más accesibles para entablar una transmisión de voz o datos. El aprovechamiento del software libre para realizar cualquier tipo de comunicación es lo que ha ayudado a realizar este tipo de proyecto. Hablar de redes inalámbricas supone también hablar de satélites, móviles, Internet y domótica entre otros, este proyecto refiere a dar conocer nuevos métodos de comunicación para controlar diferentes tipos de máquinas a larga distancia, este artículo se desarrolló para la investigación de señales de internet sin la necesidad de tener cables conectados y de esté modo facilitar el movimiento del computador estando más cómodamente con él. Comprendimos la importancia de actualizar los medios que se tienen para el control a distancia de diversas máquinas o procesos, ya que algunas veces son de difícil acceso. Actualmente se trabaja en la etapa de modulación de ancho de pulso y el freno mecánico hasta el momento no se ha concluido dichas etapas, pero el objetivo principal que nos hemos trazado se ha cumplido hasta el momento.

Referencias

[1] Theodore Wildi. *"Maquina Eléctricas y Sistemas de Potencia"*, Prentice Hall, Sexta Edición,2007.
[2] Torrente Artero Óscar. *"Arduino Curso Practico de Formación"*, Alfaomega, 1ª Edición, 2013.
[3] Ph.D.Jack Purdum. *"Beginning for Arduino. Learn C Programming for the Arduino and Compatible Microcontrollers"*, Apress, First Edition, 2012.
[4] Stephen J. Chapman. *"Maquina Eléctricas"*, Mc Graw Hill, Quinta Edición,2012.
[5] Muhammad H. Rashid. *"Electrónica de potencia"*, Prentice Hall, 3ª Edición, 2004.
[6] D. Petruzella Frank. *"Electric Motors Control System"*, McGraw Hill, 1ª Edición, 2010.
[7] Pedro Ponce Cruz. *"Maquina Eléctricas y Técnicas modernas de control"*, Alfaomega, Primera Edición, 208.
[8] Aceves J, Flores E y Aguilar J. *"Aplicación en Telefonía Móvil para el Control de un Motor Trifásico Mediante Comunicación Bluetooth"*, 13° Congreso Nacional de Mecatronica, Asociación Mexicana de Mecátronica,141-146,QueretaroOctubre2014

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

34. Un algoritmo genético con distribución caótica

García Mejía Juan Fernando, Torres Reyes Carlos Eduardo, García Mejía José Antonio

fgarciam@uaemex.mx, edtore75@hotmail.com, jagm_1000@live.com

Universidad Autónoma del Estado de México Centro Universitario UAEM Atlacomulco
Carretera Toluca-Atlacomulco Km.60 Atlacomulco Estado de México

Resumen

La repetitividad, es decir, la estabilidad de los algoritmos evolutivos con respecto a varias ejecuciones, es un área emergente en el estudio de los algoritmo genéticos, para esto se han desarrollado diferentes estrategias, tales como variantes en los operadores de cruzamiento y mutación. Un enfoque novedoso en este tema es el uso de funciones caóticas en la generación de cromosomas, esto es abordado en este trabajo, usando como caso de estudio la optimización del inverso del error cuadrático medio de un controlador PID aplicado a una celda termoeléctrica.

Los algoritmos empleados en este trabajo fueron codificados en Scilab, un software matemático de licencia GNU, la repetitividad se calculó por medio de la desviación estandar relativa, sobre 50 ejecuciones. *Los resultad*
solo 10% de las ejecuciones se alejan de la media, en relación con el 35% de un algoritmo cuyos cromosomas fueron generados por medio de una distribución de probabilidad uniforme. Los resultados obtenidos constituyen una aportación importante en el campo del control inteligente dado que permitirá la implementación de técnicas de control adaptativas.

Palabras clave: Celda termoeléctrica, algoritmo genético, Scilab, función caótica

1. Introducción

Los algoritmos evolutivos y bioinspirados se han vuelto de gran importancia en los últimos años dentro del área de la inteligencia artificial ya que han demostrado ser eficientes y eficaces en la solución de problemas de clasificación y optimización.[1] estas técnicas se basan en una población de soluciones llamadas individuos lo que hace posible una exploración amplia en el espacio de búsqueda, la población es generada de forma aleatoria y pasa por un ciclo de estrategias y operadores de variación para mejorar a los individuos de la población.

Una celda termoeléctrica (TEC) es un dispositivo semiconductor de dos caras el cual se caracteriza por una diferencia de temperaturas entre las dos caras ya que una absorbe el calor del ambiente mientras la otra lo disipa esto se debe a que se hace circular una corriente por un semiconductor, Una celda termoeléctrica está formada por dos semiconductores uno tipo P y otro tipo N produciendo así el efecto Peltier [2] además de esto presentan ventajas como su tamaño reducido, así como el largo tiempo de vida útil y además es amigable con el medio ambiente,

Una celda termoeléctrica de manera típica está caracterizada por la función de transferencia descrita en la ecuación 1, mientras que la Figura 1 muestra una respuesta típica de una TEC.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

$$\frac{\tilde{T}_L(s)}{\tilde{I}(s)} = G_I(s) = -6.4061\left(\frac{0.064s+0.00854}{s^2+0.5964s+0.00855}\right) \quad (1)$$

La respuesta de la TEC se puede mejorar con el uso de técnicas de ingeniería de control, la cual se encarga del estudio de esquemas que manejen las respuestas de fenómenos físicos mediante actuadores, Uno de los esquemas más usados dentro de la ingeniería de control es el controlador Proporcional, Integral, Derivativo (PID) cuya expresión matemática se muestra en la ecuación 2, La expresión matemática de la TEC controlada por medio de un PID se muestra en la ecuación 3, donde R(s) es la señal de referencia de la temperatura a la que se desea llegar.

$$PID = C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad (2)$$

$$\mathrm{T(s)} = \frac{\mathrm{G_I(s)C(s)}}{1+\mathrm{G_I(s)C(s)}}\mathrm{R(s)} \quad (3)$$

La cual se puede manipular por medio de técnicas de ingeniera de control tales el controlador Proporcional Integral Derivativo (PID), este es el más usado en el sector industrial, su función de transferencia en su implementación paralela se describe en la ecuación 2 y consiste de tres ganancias denominadas k_p, k_i, k_d

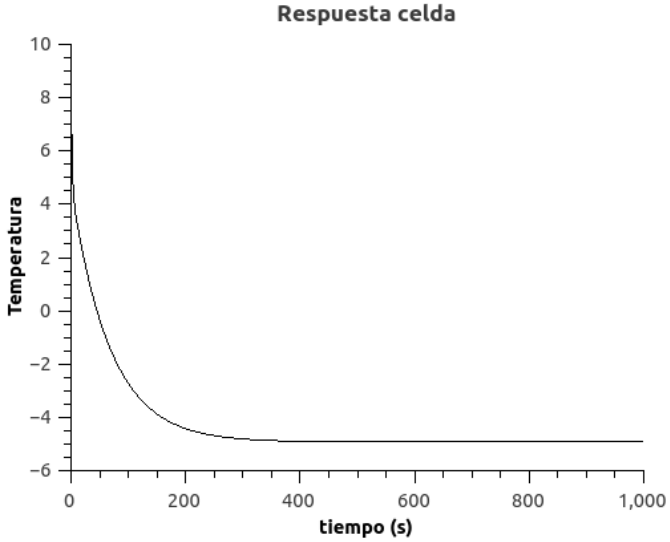


Figura. 1. Respuesta de una celda termoeléctrica

2. Algoritmos genéticos

El ajuste de los valores k_p, k_i, k_d se realiza de manera habitual por métodos analíticos como el criterio de Zigler-Nichols, una alternativa a este se encuentra en el uso de técnicas evolutivas, las cuales en términos generales son series de pasos definidos con aplicación en la optimización con la capacidad de evolucionar [3], una de ellas es el algoritmo genético simple o canónico (GA, por sus siglas en inglés), desarrollado por John Holland en la década de los 60 en la Universidad de Michigan, en base a los principios biológicos presentes en la naturaleza descritos por Charles Darwin y Gregory Mendel [4]

El uso de técnicas evolutivas y en específico de algoritmos genéticos en la sintonización de controladores PID es documentado en la literatura especializada, como muestra Mohd S et al [5] donde realizan una comparación entre evolución diferencial, algoritmos genéticos y criterio de Zigler-Nichols, demostrando que las técnicas evolutivas presentan ventajas en cuanto al desempeño con respecto a técnicas analíticas como Zigler- Nichols; Li J et al [6] realizaron un algoritmo genético con codificación

real, el cual no demuestra diferencias significativas con respecto al uso de un enjambre de partículas. Reynoso G et al [7] muestra un procedimiento de sintonización automática de parámetros de un controlador PID en forma serie, el cual muestra ventajas sobre Zigler-Nichols al controlar la respuesta de un conjunto de plantas de prueba propuestas de manera teórica. Renato A et al [8] utiliza un algoritmo genético con codificación real para sintonizar un PID de dos grados de libertad, como planta de estudio se propone la función característica de un servomotor. Valarmathi et al [9](Valarmathi, 2012) controla el nivel de líquido de un tanque modelado como un sistema no lineal utilizando un controlador PID. [10]Yang M et al controlan la velocidad de rotación de un motor a través de un algoritmo genético cuyo criterio de paro es la convergencia del algoritmo.

En base a lo documentado en el estado del arte se puede aseverar que la sintonización de controladores tipo PID realizada por algoritmos genéticos ofrecen mayores ventajas que el criterio de Zigler-Nichols, [11], [7], [9] cabe destacar que la codificación empleada en los citados trabajos fue binara, esto puede presentar errores de truncamiento en el momento de representar las variables k_p, k_i, k_d.; esto es solucionado por una codificación real, por último en [10] se documenta el paro de algoritmo genéticos por medio de la convergencia de la función objetivo.

Con lo anterior en mente se propone realizar la sintonización de un controlador PID aplicado a una celda termoeléctrica por medio de un algoritmo genético simple, con codificación real, pero haciendo énfasis en el estudio del operador de cruzamiento dado que no fueron documentados en [12] las variantes que presenta el cruzamiento aritmético empleado, además de estudiar su repetitividad es decir su estabilidad, con respecto a las veces que se itera, esto por medio del cálculo de la desviación estándar relativa de 50 ejecuciones. La repetitividad puede mejorarse de forma substancial por medio de la generación de cromosomas por medio de funcionas matemáticas de comportamiento caótico

Un algoritmo genético simula algunos aspectos propios de la teoría de la evolución de las especies de Darwin. Los mejores individuos de una determinada población tienen mayores posibilidades de supervivencia y reproducción; las posibilidades disminuyen o son nulas para los débiles. Los pasos que caracterizan a un algoritmo genético simple son los siguiente [13] y [14].

i. definir una función de aptitud o función objetivo
ii. generar una serie de posibles soluciones de manera aleatoria (población)
iii. codificar la población
iv. evaluar con la población, iniciando así la i esima generación
v. seleccionar soluciones que se reproducirán
vi. aplicar una operación de cruzamiento
vii. mutar algunos elementos resultantes del cruzamiento
viii. reemplazar elementos de la población de la i esima generación con los mejores elementos de vi y vii
ix. detener, si se cumple criterio de paro, y en caso contrario saltar a iv

Como se mencionó en secciones anteriores, un algoritmo genético tiene una función objetivo, para este caso la función objetivo se puede construir a partir de la función de transferencia en lazo cerrado del esquema propuesto en la figura 2 y las ecuaciones (1) y (2) obteniéndose la expresión matemática (3).

$$\mathrm{T}(s) = \frac{\mathrm{G_I}(s)\mathrm{C}(s)}{1+\mathrm{G_I}(s)\mathrm{C}(s)}\mathrm{R}(s) \tag{3}$$

De (2) y (3) se puede observar que la salida $\mathrm{T}(s)$ depende de los valores k_p, k_i, k_d, así mismo de la figura 2 se puede definir (4).

$$(s) = (s) - (s) \tag{4}$$

Ahora bien, una función objetivo se puede definir como se muestra en (5) [14], a partir de esta información y del concepto de valor cuadrático medio es posible construir la función objetivo que se

muestra en (6) donde T es el tiempo de simulación

$$\text{min(max) } f(x),\ x = [x1, x2, \ldots xn]T \in \mathrm{R}n \tag{5}$$

$$\mathrm{f_{obj}}(\mathrm{k_p}, \mathrm{k_i}, \mathrm{k_d}) = \max\left(\frac{1}{1+\sqrt{\frac{1}{\mathrm{T}}\int_0^{\mathrm{T}} \mathrm{E}(\mathrm{k_p},\mathrm{k_i},\mathrm{k_d})^2}}\right) \tag{6}$$

La colección de sujetos propuestos como posibles soluciones son generados de manera aleatoria (40 en total) con una distribución uniforme, codificando los cromosomas con números reales, de tal forma que el formato del cromosoma tiene la siguiente forma.

$$\text{cromosoma} = \left[\mathrm{k_p}, \mathrm{k_i}, \mathrm{k_d}\right]^{\mathrm{T}}$$

Los cromosomas que se seleccionaron para el cruzamiento en sucesivas generaciones fueron escogidos mediante una ruleta, donde los sujetos con mayor valor de afinidad, (mayor valor de (k_p,k_i,k_d) se privilegian sobre los de menor afinidad. El operador de ruleta es el más estocástico de los métodos de selección, en relación con el torneo y el elitismo, es por eso que fue empleado en este trabajo.

El cruzamiento es determinado por el tipo de codificación. En este caso se emplea el operador de cruce denominado aritmético, cuyo procedimiento se muestra en esta sección.

Sean dos cromosomas $C_1 = [{k_p}^1,{k_i}^1,{k_d}^1]$ y $C_2 = [{k_p}^2,{k_i}^2,{k_d}^2]$ que fueron seleccionados mediante un procedimiento de ruleta, los descendientes de estos $H_k = [{k_p}^k,{k_i}^k,{k_d}^k]$ donde k = 1,2 son generados mediante, para α = [0,1].

$$H_1 = (C_1 + ((1-\alpha) * C_2)$$
$$H_2 = (C_2 + ((1-\alpha) * C_1)$$

Si α varia en las generaciones se tiene un cruzamiento no uniforme, al igual que si varía en cada cruzamiento

3. Resultados

En este trabajo se realizó el contraste entre las dos posibles situaciones presentes en el valor de α y el criterio de Zigler-Nichols, cabe destacar que los desarrollos documentados no estudian la repetibilidad del algoritmo La mutación se mutan 2 individuos por cada generación, para esto se utiliza el operador genético de mutación por paso cuyo proceso se muestra a continuación A partir de un cromosoma C'se puede obtener un cromosoma transformado o mutado C'' a partir de la siguiente expresión donde el tamaño de paso de la mutación β = [0,1] y la dirección de la misma se representa por d (7)

$$C'' = C' + \beta * d \ (7)$$

Como se muestra en el pseudocódigo listado en la sección 2.2 el algoritmo se ejecutara hasta que se cumpla un determinado criterio, los cuales en términos generales son dos: un determinado número de ejecuciones (denominadas generaciones) o la convergencia del algoritmo, este último es el empleado en esta propuesta.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

4. Resultados

Para encontrar cual método de ajuste de parámetros de un PID es mas eficiente en la minimización del error cuadrático medio de una celda termoeléctrica se desarrollaron una serie de simulaciones codificadas en Scilab con una temperatura de referencia o de set point de -5 grados centígrados, en la primera se sintonizó el controlador por medio del ajuste de Zigler-Nichols, obteniéndose como respuesta la mostrada en la Figura 2. Posteriormente se realizó un conjunto de 50 ejecuciones a los algoritmos genético canónico y el que tiene una población generara por funciones caóticas, con la finalidad de determinar la estabilidad de estos con respecto al numero de veces que se ejecuta el algoritmo, esta se calcula a partir de la desviación estándar relativa (desviación estándar sobre media aritmética) los resultados de esta prueba de repetitividad se observan en la tabla 1. En la tabla 2 se muestran los resultados promedios de las 50 ejecuciones de los algoritmos propuestos, en la tabla 3 se muestran algunos criterios de desempeño del controlador ajustado por Zigler-Nichols. En la Figura 4 se grafican las respuestas promedios obtenidas de los algoritmos genéticos canónicos; mientras que en la figura 5 se representan las respuestas de los algoritmos genéticos con población caótica.

Tabla 1. Resultados de la estabilidad de los algoritmos propuestos

Técnica	Desviación estándar relativa de la función objetivo (%)	Desviación estándar relativa de la ganancia k_p	Desviación estándar relativa de la ganancia k_i	Desviación estándar relativa de la ganancia k_d
GA no uniforme generacional	2.2139	19.7723	26.7916	26.1840
GA no uniforme durante la cruza	3.1341	24.6446	29.5704	28.6616
Funciones caóticas	0.5212	5.7215	15.4956	7.4130

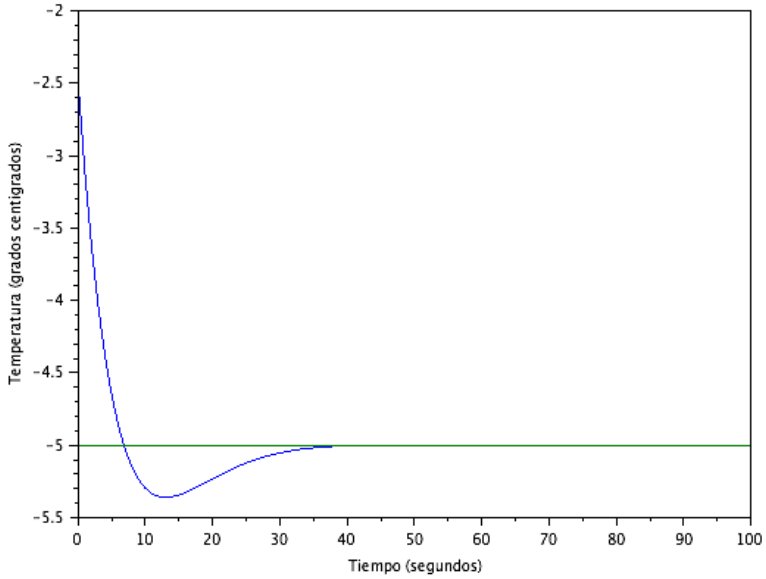


Figura 2. Respuesta de la TEC con PID ajustado por Zigler-Nichols

5. Conclusiones

El uso de funciones caóticas aumenta la estabilidad de los algoritmos genéticos, lo cual se traduce a una repetibilidad más cercana a las medias de las funciones objetivos. El resultado de este trabajo, a futuro impactara en el desarrollo de controladores adaptativos

La última sección, la de referencias, no se enumera. En esta sección se muestra la información bibliográfica de las principales referencias utilizadas por el autor. La lista de las referencias se ordena de acuerdo al orden de aparición en el artículo. Nótese la diferencia entre la referencia a un artículo en revista, a un libro o a un artículo en las memorias de un congreso. La separación entre una referencia y otra es de un renglón. Usar sangría de 1 cm en los renglones siguientes al primer renglón. Utilizar tipo de letra: Arial, normal, de 10 pt. Escribir con tipo cursiva únicamente el título de la obra.

Referencias

[1] Tarter R., Solid-state power conversion handbook.United State of America: John Wiley and Sons 1993
[2] Song Shaojing Temperature Control of Thermoelectric cooler Based on Adaptive NN-PID International Conference on Electrical and Control Engineering 2010
[3] Burger, C. Propeller performance analysis and multidisciplinary optimization using a genetic algorithm. Auburn University). ProQuest Dissertations and Theses 2007
[4] Yang X. S. Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms United Kingdom : Luniver Press 2011
[5] M.S.Saad, H.Jamaluddin,I.Z.M. Darus "Implementation of PID Controller tuning using differential evolution and Genetic Algorithms," Int. J. of Innovative Computing, Information and Control (ICIC), Vol 8, num 11, pp 7761-7779, Nov 2012
[6] Li Junli,Mao Jianlin, Zhang Guanghui "Evolutionary algorithms based parameters tuning of PID controller", Control and Decision Conference, Mianyang, China, pp 416-420, 2011.
[7] G. Reynoso-Meza, J. Sanchis, J.M. Herrero, C. Ramos, "Evolutionary auto-tuning algorithm for PID controllers", IFAC Conf. on Advances in PID control PID'12, Brescia(Italy), March 28-30, 2012.FrB1.6.
[8] Renato A. Krohling and Joost P. Rey “Design of Optimal Disturbance Rejection PID Controllers Using Genetic Algorithms” IEEE Transactions on
[9] R.Valarmathi, P.R.Theerthagiri, S.Rakeshkumar “Design and Analysis of Genetic Algorithm Based Controllers for Non Linear Liquid Tank System” Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM), pp 616 - 620 March 2012
[10] Ming Yang Lei Zhang ; Weiping Zhao ; Zhanshuang Hu “Optimization of dc motor rotary speed controller based on the genetic algorithm” World Automation Congress (WAC), 2012, pp 1-4 June 2012
[11] M.S.Saad, H.Jamaluddin,I.Z.M. Darus "Implementation of PID Controller tuning using differential evolution and Genetic Algorithms,"
[12] Li Junli,Mao Jianlin, Zhang Guanghui "Evolutionary algorithms based parameters tuning of PID controller", Control and Decision Conference, Mianyang, China, pp 416-420, 2011. Evolutionary computation, vol. 5, no. 1, february 2001
[13] Mitchell, M. “An introduction to genetic algorithms. MIT Press” USA 1998.
[14] Mitsuo Gen, Runwei Cheng. “Genetic algorithms and engineering optimization”. John Wiley and Sons, 2000

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

35. Diseño y Construcción de un Prototipo de Robot Educativo para Apoyo de la Enseñanza de los Números a Nivel Preescolar

Elmar Montiel Jiménez, Guillermo Córdova Morales, Fidel Paredes Xochihua, Juan Ramón Campos Peña

pumandrin2@hotmail.com, gcormora@hotmail.com

Instituto Tecnológico Superior de Libres
Camino Real Esq. Calle Cuauhtémoc, Barrio de Tétela, Libres Puebla. C.P. 73780

Resumen

El presente artículo describe los resultados parciales de la primera etapa del proyecto denominado "Diseño e Implementación de un Robot Educativo, para enseñanza de la Matemáticas a Nivel Preescolar", dicho proyecto tiene como objetivo principal, apoyar de forma dinámica y didáctica a las educadoras, en la enseñanza de las matemáticas a nivel preescolar. Los resultados que se describen a continuación corresponden al diseño y construcción del prototipo, que servirá como base para el avance y puesta en marcha de las siguientes etapas del proyecto. El prototipo desarrollado, es un sistema móvil de ruedas que tiene la capacidad de moverse a lo largo de un tablero, en el cual se le pueden colocar tarjetas o fichas que corresponden a un numero natural del cero al nueve, y el robot, por medio de una pantalla Smart GPU, muestra con imágenes si la posición de las fichas es correcto. El programa se realizo bajo el entorno de Arduino.

Palabras clave: Robot Educativo, Arduino Uno, Enseñanza de Números, Preescolar, Smart GPU.

1. Introducción

La robótica, es una de las tecnologías más importantes en la nueva era de la sociedad en la búsqueda de nuevas tendencias tecnológicas, el estudio de la robótica móvil juega un papel muy importante en diversas áreas y aplicaciones que van desde diversos sectores del quehacer humano, tales como el industrial, militar, exploración espacial, entretenimiento, asistencia médica, seguridad, educación, entre otras muchas aplicaciones.

Aun cuando la innovación de robots ha desempeñado un papel en la inteligencia artificial y robótica para la educación por más de 30 años, el costo y el tamaño de estas plataformas han limitado su alcance. Recientemente, plataformas de bajo costo de robots que han surgido, han extendido los beneficios educativos a una audiencia diversa. [2] Entre los ejemplos de la intensa actividad en esta área se incluyen concursos y exposiciones en todos los niveles, la disponibilidad de planes de estudios en línea y libros de texto, ediciones de revistas especializadas, y los últimos talleres aplicados en la relación entre la robótica y la educación.

A nivel mundial se han venido generando investigaciones en varios aspectos que involucran a la robótica con la educación y la innovación. A partir de un análisis de realizado en [3], las investigaciones en el ámbito de la Robótica Educativa se direccionan en dos enfoques el enfoque pedagógico, y el enfoque técnico. En el enfoque pedagógico se refiere a la utilización de la robótica como una estrategia pedagógica para la enseñanza de varias áreas escolares como matemáticas, cálculo, ciencias,

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

informática, diseño, entre otras aéreas de la ciencia e ingeniería. En diferentes ambientes como la escuela primaria y secundaria, y la universidad. Por otro lado el enfoque técnico se trata de una rama muy investigada en robótica llamada robótica multiagente o cooperativa. Y la investigación, para generar innovación en el hardware y software de robótica.

La robótica educativa es propicia para apoyar habilidades productivas, creativas, digitales y comunicativas y se convierte en un motor para la innovación cuando se produce cambios en las personas, en las ideas y actitudes, en las relaciones, modos de actual y pensar de los estudiantes y los educadores. El presente artículo se encuentra dividido en cuatro apartados, para el siguiente apartado dos, se encuentra la metodología diseñada para la ejecución del planteamiento descrito, en el apartado tres se encuentra un análisis de resultados y las conclusiones en el apartado cuatro.

2. Metodología

En la siguiente figura 1 se puede observar de mejor manera la metodología diseñada para la solución del problema planteado, en el texto continuo, se explica brevemente cada uno de los puntos trazados antes de las pruebas y resultados.

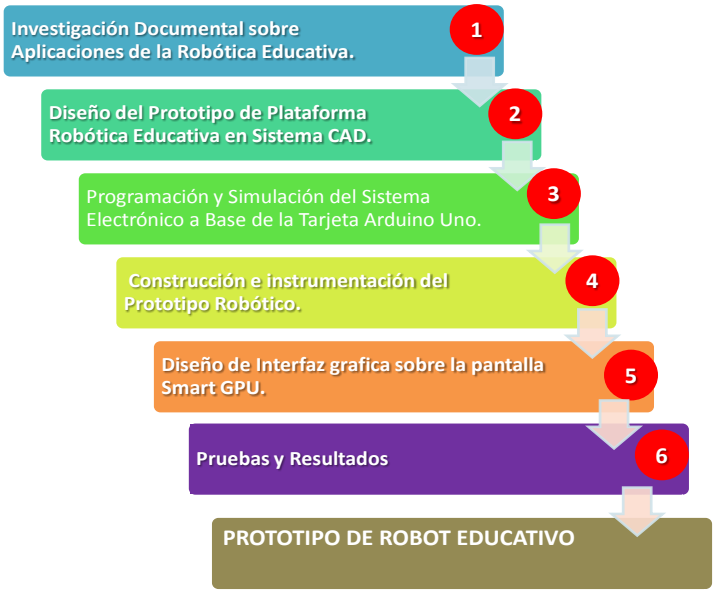


Figura 1. Metodología diseñada para el prototipo de Robot Educativo.

Como se puede observar en la figura 1, la metodología diseñada se compone de seis puntos importantes, para la obtención del producto final, las cuales se describen brevemente a continuación:

2.1 Investigación Documental Sobre Aplicaciones de la Robótica Educativa

En primera instancia, se procedió a buscar información sobre la aplicación de la Robótica Educativa en las aulas de clases, con el fin de obtener parámetros necesarios e importantes, para la construcción de un prototipo didáctico, que sirva como apoyo a la enseñanza de los números a nivel preescolar, dicha investigación se realizó atreves de artículos, tesis, páginas web y videos.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

2.2 Diseño del Prototipo de Plataforma Robótica Educativa en Sistema CAD

Para apartado dos, se procedió a diseñar por medio de un software CAD, un boceto de piezas, que darán forma al Robot Educativo, tomando como base algunos proyectos revisados y algunas mejoras que tendrá el Robot Educativo, en la figura 2, se puede apreciar de mejor forma algunos diseños de piezas realizados en el software CAD.

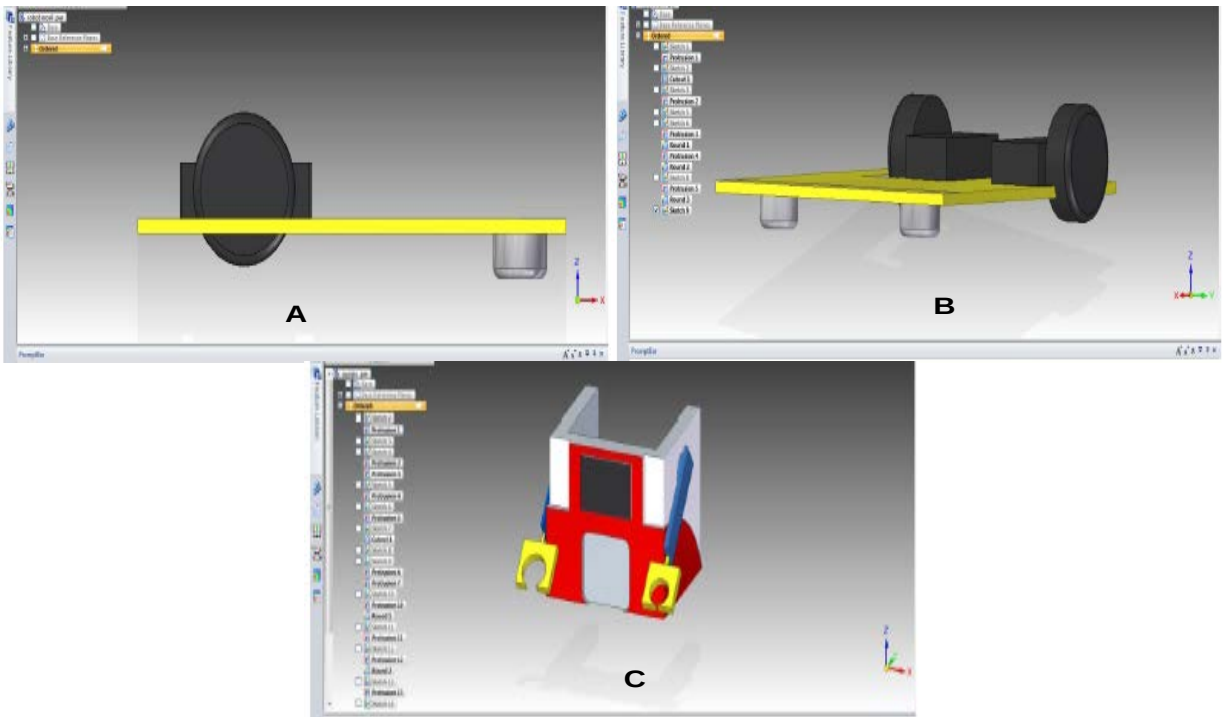


Figura 2. Ejemplo de imágenes del proceso de ensamble diseñadas en el software CAD.

El objetivo de diseñar el Robot Educativo en Software CAD, es tener un diseño previo de cómo se quiere el prototipo y también, obtener un diseño formal para su manufacturación.

2.3 Programación y Simulación del Sistema Electrónico de Control a Base de la Tarjeta Arduino Uno

Una vez finalizada la etapa número dos, como siguiente paso, es el diseño y programación del sistema electrónico que gobernara el Robot Educativo, dicho sistema está controlado por medio de una tarjeta Arduino Uno, la cual envía señales de control a dos servomotores posicionados para locomoción diferencial, para que tengan movimientos autónomos dependiendo de los valores arrojados por los sensores infrarrojos. En la figura 3 se puede apreciar de mejor forma, las herramientas utilizadas para la simulación.

Los sensores infrarrojos fueron reemplazados por cuatro microswitch y la pantalla Smart GPU fue reemplazada por el monitor serial, con el objetivo de observar los resultados cuando una posición binaria sea detectada por los sensores, en la figura 4 se puede observar de mejor forma el comportamiento de la simulación.

El objetivo principal del programa es identificar un código binario por medio de los sensores infrarrojos, para que dicho número sea representado en una pantalla Smart GPU, en la Tabla 1 se puede apreciar la configuración binaria que corresponde a cada número que se debe mostrar por el robot.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

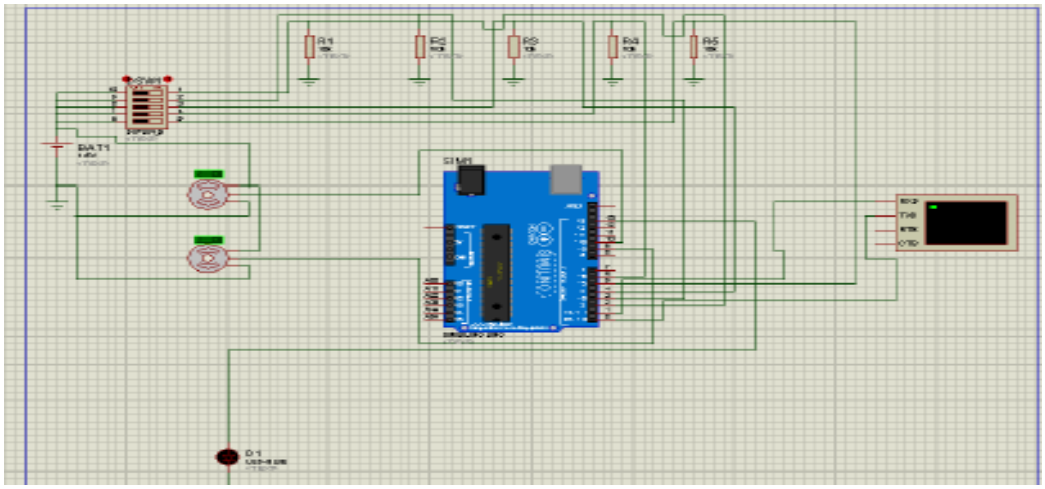


Figura 3. Elementos que integran el sistema electrónico.

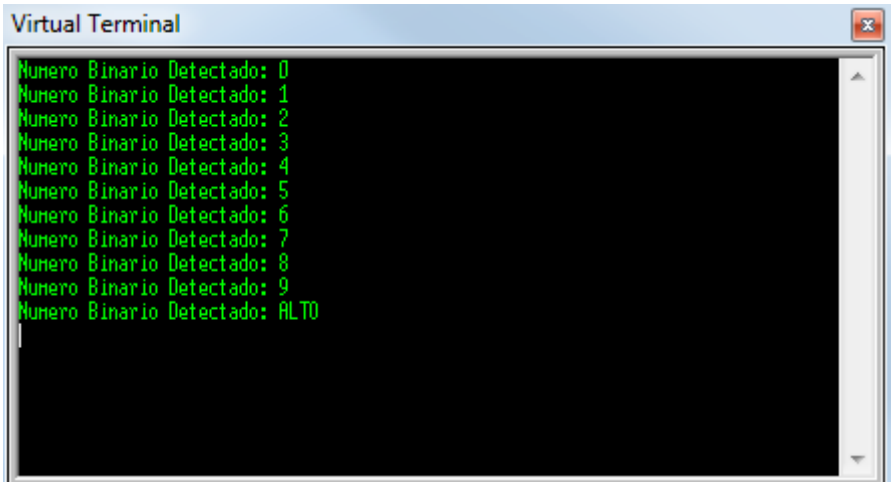


Figura 4. Datos mostrados por el monitor serial.

Tabla 1. Configuración de los Sensores Infrarrojos.

Código Binario (Sensores IR)	Numero a Mostrar
▢▢▢▢	0
▢▢▢■	1
▢▢■▢	2
▢▢■■	3
▢■▢▢	4
▢■▢■	5
▢■■▢	6
▢■■■	7
■▢▢▢	8
■▢▢■	9
■■■■	ALTO

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Como se aprecia en la Tabla 1, los números que se mostraran en imágenes por la pantalla Smart GPU, corresponden a su valor numérico binario, que se conforma por el arreglo de cuatro sensores infrarrojos, también existe una rutina de alto para que el Robot Educativo se pare.

El diagrama de flujo que representa el programa diseñado se puede observar en la figura 5.

La programación realizada sobre la tarjeta Arduino Uno, se basa en el diagrama de flujo descrito en la figura 5 y solo se realizaron pequeñas modificaciones derivadas por el entorno de programación.

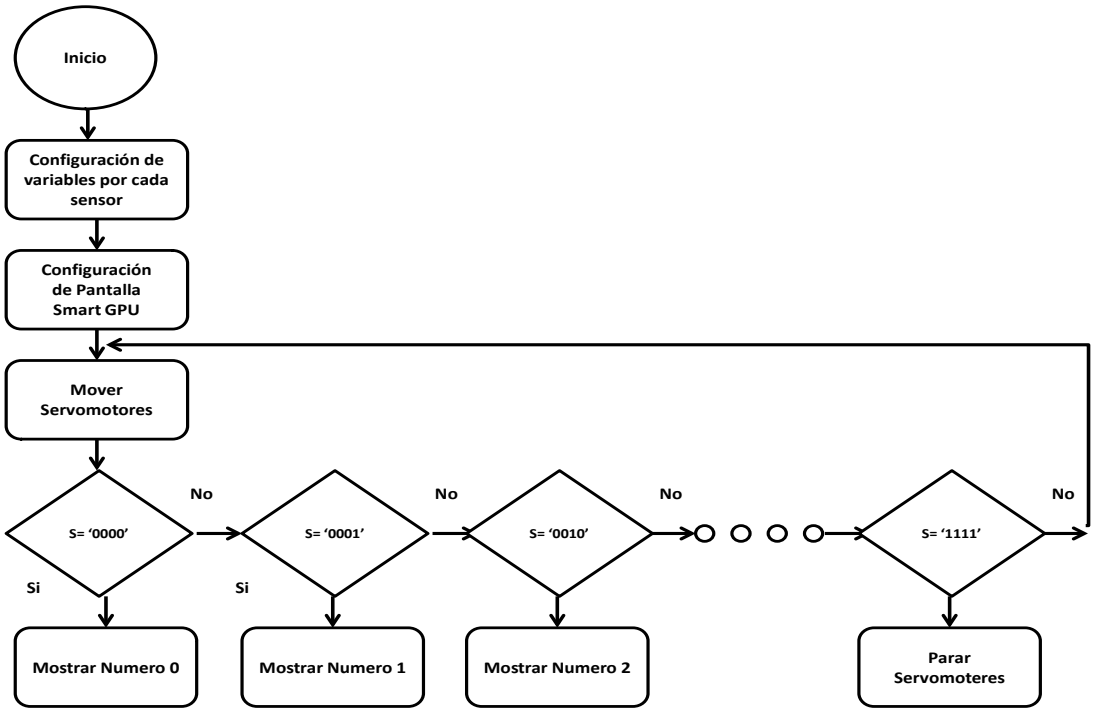


Figura 5. Diagrama de flujo Diseñado.

2.4 Construcción e Instrumentación del Prototipo Educativo

Una vez que se concluyo la etapa 3 de la metodología diseñada, se siguió con la etapa de construcción del prototipo, en la figura 6, se puede apreciar algunas imágenes que demuestran la evolución de la construcción.

Como se puede apreciar en la figura 6-A, la construcción comenzó con la colocación de las llantas y servos sobre la plataforma, también podemos dallarlo en la figura 6-B, en el caso de la figura 6-C se puede observar la integración de la pantalla, y por último, en la figura 6-D se observa la colocación del *shield* de la pantalla Smart GPU sobre la tarjeta Arduino Uno, tal y como se especifico anteriormente.

2.1 Diseño de la Interfaz Grafica sobre la pantalla SMART GPU.

El sistema embebido Smart GPU es un dispositivo electrónico, fácil de utilizar para la elaboración de gráficos y audio, y que cuenta con una potente pantalla LCD táctil de color. El sistema embebido se desarrollo a base de un chip tipo ARM Cortex-M3, el cual tiene la capacidad comunicarse de forma rápida con cualquier dispositivo que cuente con conexión serial. Este dispositivo fue desarrollado con el fin de crear interfaces graficas avanzadas con el conocimiento mínimo del sistema, actualmente el distribuidor de la pantalla Smart GPU, ha desarrollado una librería para la tarjeta Arduino Uno, la cual

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

fue utilizada la para el desarrollo del presente proyecto, en la figura 7 se puede apreciar la integración de la pantalla en el Robot Educativo.

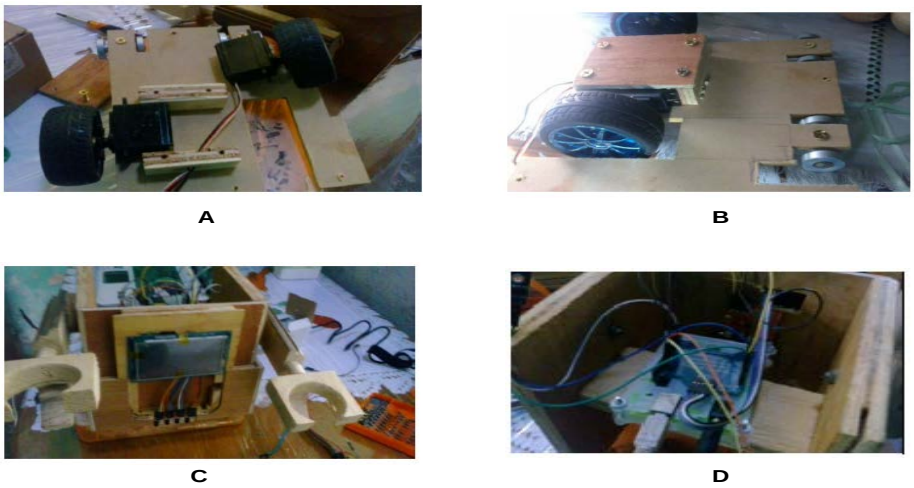


Figura 6. Evolución de la construcción del prototipo robótico educativo.

Figura 7. Integración de Pantalla Smart GPU al Prototipo.

Como se puede apreciar en la figura 7, después de construir el prototipo robótico, se procedió a programar la interacción de la pantalla con la tarjeta Arduino Uno.

Para poder probar el prototipo se construyó un tablero alterno para que el robot pudiera deslizarse y de esta forma observar el comportamiento de la programación realizada, y los efectos visuales que se designaron que mostrara la pantalla Smart GPU.

3. Análisis de resultados

La figura 8, se muestra el diseño final del Robot Educativo, realizado bajo el sistema CAD, se puede observar que el diseño se ensamblo por piezas, lo que facilitaría una manufacturación en una impresora 3D en posteriores etapas del proyecto, también se realizo un diseño no tan robusto para su fácil construcción en este caso y se mantuvo los espacios para los elementos electrónicos y mecánicos.

En la tabla 2, se describe de mejor forma los resultados obtenidos, al realizar las pruebas de funcionamiento del prototipo de Robot Educativo y la pantalla Smart GPU.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

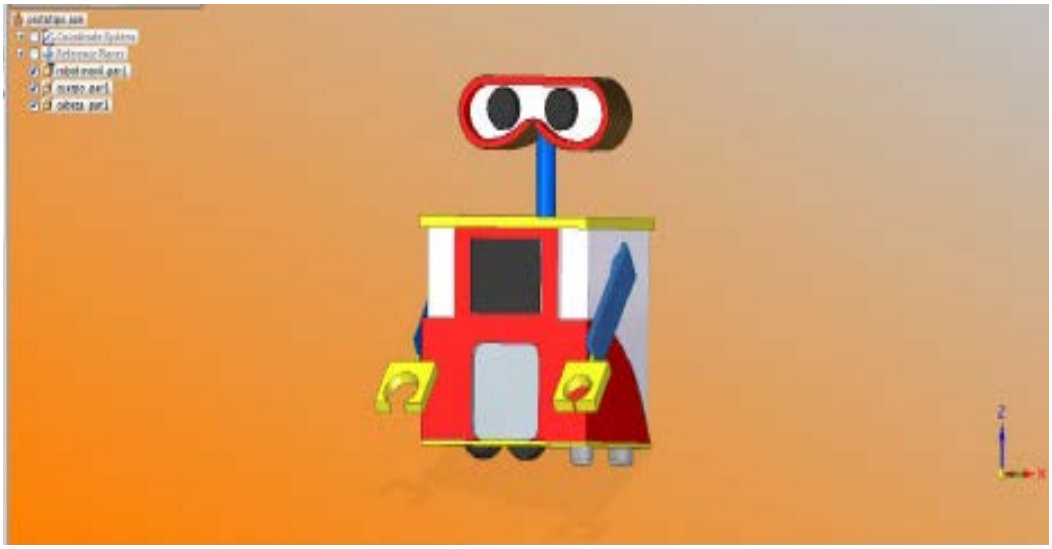


Figura 8. Resultado final del Diseño en Software CAD.

Como se puede observar en la tabla 2, los números son correctamente mostrados al recibir la sentencia por parte de la tarjeta Arduino Uno, una vez que es sensado por el arreglo de sensores infrarrojos. Estas pruebas se realizaron antes de montar en su totalidad el prototipo para realizar correcciones en conexiones y programación.

En la figura 8 se puede apreciar el avance actual del ensamble del Robot Educativo, cabe mencionar que al momento de realizar el presente artículo no se había concluido en su totalidad el proyecto, ya que faltan realizar algunas mejoras al prototipo y probar una dinámica de juego, para su implementación en las aulas de nivel preescolar.

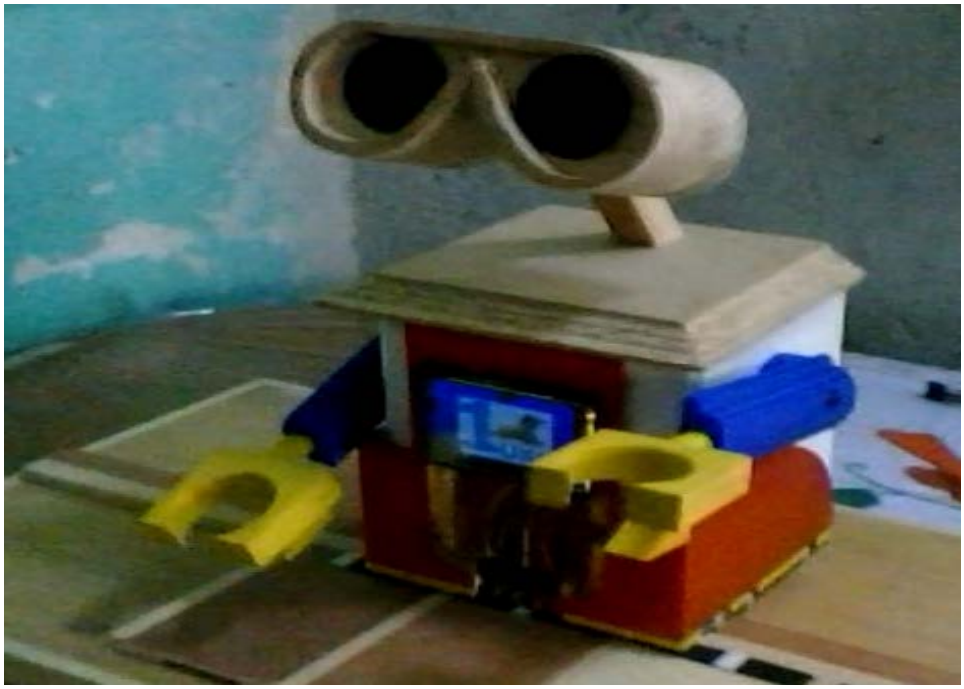


Figura 7. Avance actual del Prototipo.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Tabla 2. Resultado de la Ejecución del Programa diseñado en el Prototipo Robótico Educativo.

Código Binario (Sensores IR)	Numero a Mostrar	Resultado	Código Binario (Sensores IR)	Numero a Mostrar	Resultado
▭▭▭▭	0		▭■▭■	5	
▭▭▭■	1		▭■■▭	6	
▭▭■▭	2		▭■■■	7	
▭▭■■	3		■▭▭▭	8	
▭■▭▭	4				

4. Conclusiones

El diseño realizado en el Software CAD de dibujo mecánico, es una representación que se trato de seguir a un porcentaje alto, a pesar de las deficiencias de material con el cual se realizo el Prototipo. Se puede mencionar que se verá la funcionalidad y dinámica de integración en un aula de clase, para realizarle mejoras al diseño planteado.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

La simulación realizada en el software de electrónica, ayuda a disminuir errores a la hora de realizar una implementación de cualquier prototipo, para este caso previno el funcionamiento de la pantalla Smart GPU, con la función de impresión serial, ya que el software no cuenta con una librería específica para la simulación de la pantalla antes mencionada.

La interfaz grafica realizada en la pantalla Smart GPU, atreves de la programación de Arduino UNO, se realizo de una forma rápida y sencilla, ya que el sistema y programación son muy amigables para cualquier usuario.

El prototipo actualmente se encuentra en proceso de diseño y mejora continua, por lo cual los resultados anteriores descritos, son de la etapa de construcción y puesta en marcha de la tarjeta Arduino UNO, para el movimiento de servomotores y monitoreo de los sensores infrarrojos que conforman un arreglo numérico binario, para que en un pantalla de Smart GPU se pueda mostrar una interfaz grafica de su representación decimal.

El presente proyecto es la primera etapa del proyecto denominado “Diseño e Implementación de un Robot Educativo para la Enseñanza de las Matemáticas”, registrado en el Instituto Tecnológico Superior de Libres, en el departamento de Investigación.

Referencias

[1] Hidalgo M., *“Introducción a la Robótica con Arduino”*, Robótica Educativa EDUCABOT, Centro de Profesores de Albacete, España, enero 2015.
[2] Parra C, Bravo F, García L, *“Generación de Ambientes de Aprendizaje Interdisciplinarios con Robótica en Instituciones Educativas de Bajos Recursos Económicos”*, WEEF, Cartagena, Colombia, 2013.
[3] Pinto M. Lombana N., Pérez W., “*Use of robotics education as a tool in the process of teaching”*, “Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia”, Pags. 15 - 23, Julio de 2010.
[4] Sánchez B., Ángela F., Guzmán F., *“La Robótica Como un Recurso para Facilitar el Aprendizaje Y Desarrollo De Competencias Generales”*, Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal, pp. 120- 136 Universidad de Salamanca Salamanca, España, 2012.
[5] S. Hussain, J. Lindh, and G. Shukur, *"The effect of LEGO Training on Pupils' School Performance in Mathematics, Problem Solving Ability and Attitude: Swedish Data "* Educational Technology & Society, vol. 9, pp. 182-194, 2006.
[6] I. Markelis, S. Atmatzidou, and S. Demetriadis, "Introduction of Educational Robotics in Primary and Secondary Education: Reflections on Practice and Theory," in Lessons Learnt from the TERECoP Project and New Pathways into Educational Robotics across Europe Athens, 2009, pp. 25-27.

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

36. Aprendizaje basado en proyectos: un ejemplo de aplicación en matemáticas y mecatrónica

Jiménez López Eusebio[1], Servín de la Mora Pulido Daniel[2], Luna Sandoval Gabriel[3], Villalba Eúan Alejandro Iván[4], Curiel Aguirre Fernando[5].

ejimenezl@msn.com

[1] Universidad La Salle Noroeste-UTS-IIMM
Veracruz S/N, Fracc. Obregón Norte, Cd. Obregón Sonora, México.
[2,4] Universidad La Salle Noroeste
[3,5] Universidad Estatal de Sonora

Resumen

Las matemáticas son necesarias y esenciales para la ingeniería y sus aplicaciones, como por ejemplo en la Mecatrónica. El aprendizaje de las mismas es todo un reto para los estudiantes y profesores. Actualmente existen varios métodos y técnicas para la enseñanza de las matemáticas, entre los que se encuentran las metodologías activas, como el Aprendizaje Basado en Proyectos (ABProy). En este trabajo se presenta una aplicación del ABProy en el aprendizaje de la materia de Cálculo Vectorial. El aprendizaje se organiza en torno a un proyecto de aplicación que consiste en desarrollar un simulador computacional que imita el proceso de siembra en un invernadero. Fueron seleccionados temas específicos de la materia de Cálculo Vectorial y temas ya vistos en Física de la Partícula para modelar el movimiento de un punto que simula una herramienta de trabajo. Se utilizó el software MATLAB para programar y visualizar la trayectoria. Los resultados obtenidos muestran la utilidad práctica del ABProy en el aprendizaje de las Matemáticas ya que impulsa el trabajo en equipo, estimula la investigación, promueve el manejo de situaciones complejas y motiva el aprendizaje activo entre los estudiantes.

Palabras clave: Metodologías activas, Aprendizaje Basado en Proyectos, Matemáticas, Simulación.

1. Introducción

La formación del ingeniero hoy en día es un desafío debido a la gran cantidad de información disponible, a la complejidad creciente de los problemas a los que se deben enfrentar y a la globalización de los mercados [1]. Además, el medio ambiente se ha convertido en un factor fundamental en la actividad del ingeniero por la necesidad de conseguir productos y procesos sustentables que no lo deterioren; igualmente, es importante la responsabilidad social que asuma el profesional frente a los productos generados por las nuevas tecnologías y su impacto en todos los ámbitos de la actividad humana. Las estructuras corporativas son cada vez más participativas, exigiéndole al profesional más trabajo en grupo y responsabilidad en la toma de decisiones [1,2]. La Ingeniería se desarrolla en función de mejorar las condiciones de la vida humana, por medio del uso deliberado de las leyes de la naturaleza para poder explotar sus recursos de forma óptima, de manera que su interés está más en lograr aplicaciones prácticas, es decir, en resolver problemas [3], y para lograr esto, se hace uso de las matemáticas, particularmente del cálculo, en calidad de instrumento de trabajo, de ahí su necesidad e importancia [4].

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

En la sociedad contemporánea nadie duda en considerar a las matemáticas como una de las disciplinas de conocimiento más importantes para el desarrollo cognitivo e intelectual porque a través de ellas se pueden potenciar las capacidades de exploración, justificación, representación, discusión, descripción, investigación y predicción [5, 6], aspectos que deberían contribuir a que los educandos desarrollen competencias. Las matemáticas deberían entonces posibilitar la organización y estructuración de la información que se percibe o recibe en una situación cotidiana o creada intelectualmente, identificar sus aspectos más relevantes, y descubrir regularidades, relaciones y estructuras para plantear conjeturas e inferencias a partir de proposiciones elementales, y así potenciar la capacidad para generalizar resultados a partir de comportamientos constantes, e incluso lograr demostraciones [5].

Las matemáticas hoy en día son fundamentales para ejercer la ingeniería y forman parte del perfil del ingeniero ya que para que se puedan satisfacer las demandas de las actuales sociedades del conocimiento, los ingenieros deben ser formados con un perfil de fisico-matematico-informatizado-aplicado [7]. Esta formación debe ser guiada con las más modernas metodologías educativas, con la información básica acerca de los estilos de aprendizaje de los alumnos y en un contexto en donde se le pueda encontrar un sentido práctico y aplicativo a las matemáticas. La función o papel de un profesor de matemáticas que da clases en ingeniería debería ser la de un guía o facilitador en el desarrollo de problemas o proyectos, pero al mismo tiempo debe ser un expositor de temas de clase claves en donde los alumnos no puedan exponerlos o estudiarlos por sí mismos. Por ello, es importante y necesario que los profesores de matemáticas sean instruidos en los nuevos modelos o enfoques educativos, que les permitan entender su nuevo rol en la práctica educativa de las matemáticas.

La Educación Basada en Competencias es una visión realtivamente nueva de las prácticas educativas en México que es utilizada para la enseñanza y aprendizaje en ingeniería. Este enfoque promueve el uso de diversas metodologías activas como el Aprendizaje Basado en Problemas (ABP) o el Aprendizaje Basado en Proyectos (ABProy) como estrategias didácticas para el aprendizaje. En relación con la enseñanza de las matemáticas las metodologías activas se han estado utilizado; por ejemplo en [8 y 9] se ha discutido el rol que juega el ABProy en la educación de la ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas. En [10] se ha utilizado el ABP para resolver problemas de regresión lineal.

En este artículo se describe una aplicación del ABProy en una material de Cálculo Vectorial impartida en ciencias básicas en las carreras de ingeniería en la Universidad La Salle Noroeste, localizada en Cd. Obregón, Sonora. Los alumnos considerados son de cuarto semestre y desarrollaron un simulador de trayectorias utilizando conocimientos de la materia, investigando temas relacionados con el proyecto y tomando cursos complementarios. Se describen las fases del ABProy y la evaluación de los desempeños.

2. Perfil del docente lasallista

Para impulsar los cambios en el modelo educativo acordes con los enfoques modernos mundiales, la Universidad La Salle Noroeste implementó en el año 2011, un Diplomado en Formación de Competencias del Perfil Docente Lasallista el cual tiene como finalidad capacitar al profesorado en la implementación en el aula de su modelo curricular por competencias, a partir de la puesta en práctica de sus herramientas conceptuales y procedimentales en la planeación, conducción y evaluación de los procesos de enseñanza y de aprendizaje, de acuerdo con el perfil docente Lasallista y los requerimientos curriculares de la materia que imparte [11]. Dentro de los temas tratados en el diplomado destaca la estrategia didáctica relacionada con el Aprendizaje Basado en Proyectos (ABProy). La dinámica del diplomado promueve que los profesores capacitados pongan en práctica los conocimientos y las estrategias docentes, con la finalidad de crear un banco de experiencias que permita la mejora continua.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

3. Aprendizaje Basado en Proyectos

El ABProy es una técnica que consiste en que el alumnado de forma colaborativa y activa planee, desarrolle y evalúe un proyecto de trabajo de aplicación práctica. Esto implica la propuesta al grupo de estudiantes de la resolución de problemas o la búsqueda de respuestas a cuestiones complejas para la cual deben diseñar un plan de actuación, ponerlo en práctica tomando decisiones a lo largo de la aplicación y resolver los problemas que vayan surgiendo [12]. El método de proyectos contiene cuatro elementos característicos: Desarrollo de habilidades de razonamiento aplicado a la realidad; la práctica se realiza en función del contenido teórico requerido por ella; se privilegia el saber hacer sobre el aprendizaje de contenidos; el contexto donde se realiza la práctica debe ser natural y el problema por abordar ha de anteponerse a los principios de las disciplinas, nunca al revés [13].

El ABProy: 1) Se basa en un interés o en una iniciativa real; 2) Los estudiantes discuten sus intereses y perspectivas en torno al tema (aconsejándose mutuamente); 3) Desarrollan su propio ámbito de actividad (planificando y tomando decisiones) y 4) Reflexionan sobre su propio proceso de aprendizaje [14]. El ABProy no tiene un método único. Se pueden distinguir cuatro fases relacionadas con el Aprendizaje Basado en Proyectos [15]:

1) Información: Los estudiantes recopilan, por diferentes fuentes, informaciones necesarias para la resolución de la tarea planeada.
2) Planificación: Elaboración del plan de trabajo, la estructuración del procedimiento metodológico, la planificación de los instrumentos y medios de trabajo, y elección entre las posibles variables o estrategias de solución a seguir.
3) Realización: Supone la acción experimental e investigadora, ejercitándose y analizándose la acción creativa, autónoma y responsable.
4) Evaluación: Los estudiantes informan de los resultados conseguidos y conjuntamente con el profesor los discuten.

4. Consideraciones sobre el proyecto

El activo más importante del ABProy es el proyecto. Es de suma importancia que los alumnos se sientan motivados, atraídos y retados por el proyecto. Para el caso del proyecto desarrollado en la materia de Cálculo Vectorial se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

1) El proyecto debería partir de una necesidad industrial que implicará una aplicación de las matemáticas, en este caso, del Cálculo Vectorial y que tuviera utilización mecatrónica en el futuro.

2) Se consideró de gran importancia el uso de herramientas computacionales para realización del proyecto.

3) Los alumnos de la materia de Cálculo Vectorial sólo desarrollarían una parte del proyecto (aquella parte de cálculo y simulación).

La necesidad industrial se resume a continuación: en los invernaderos se llevan a cabo operaciones de siembra de precisión. En una primera etapa las semillas de un determinado producto deben ser sembradas una a una en pequeños cubos por medio de un robot cartesiano. En una segunda etapa, la semilla ya germinada, debe trasladarse a otro lugar del invernadero para ser trasplantada. El proyecto global consistió en desarrollar un robot cartesiano que fuera capaz de sembrar con precisión las semillas en cubos pequeños. Las especificaciones del proyecto proporcionadas por una empresa solicitante fueron las siguientes:

1) Diseño en CAD de las partes y ensamble del robot.
2) Desarrollo de un simulador del robot.
3) Uso de técnicas de manufactura aditiva para la fabricación de partes del robot.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

El profesor analizó la necesidad industrial y comentó el proyecto con alumnos de Mecatrónica e Ingeniería en Diseño Industrial de semestres avanzados. El objetivo fue analizar las especificaciones del proyecto y generar una guía metodológica, la cual se describe de la manera siguiente:

i. Construir el modelo cinemático del robot cartesiano.
ii. Generar un modelo de la trayectoria.
iii. Integrar los modelos del robot y de la trayectoria.
iv. Utilizar un software de cálculo formal para la programación del modelo cinemático del robot y el modelo de trayectoria.
v. Diseñar el robot en un software CAD.
vi. Construir un simulador del robot para Ipad.
vii. Fabricar los elementos del robot usando manufactura convencional y aditiva.
viii. Desarrollar el control del prototipo.
ix. Efectuar las pruebas necesarias a los prototipos desarrollados.
x. Entregar el proyecto a la empresa.

Con esta información de referencia, se procedió a formar dos grandes grupos de trabajo: 1) Uno de semestres avanzados el cual sería el responsable directo del proyecto y 2) El grupo de Cálculo Vectorial que participaría en una de las fases. En este artículo sólo se reporta las actividades del grupo de la materia de Cálculo Vectorial.

5. Desarrollo de la experiencia

En esta sección se describe la experiencia de la aplicación del ABProy en una materia de Cálculo Vectorial. Se utilizaron las fases del ABProy propuestas en [15].

5.1 Información

La primera fase del ABProy es la información. Las actividades realizadas por el profesor fueron las siguientes:

1) Analizar y planear la fase del proyecto en que podrían participar los alumnos de Cálculo Vectorial.

2) Proponer una pre-guía metodológica para el desarrollo del proyecto.

El profesor planteó a los alumnos la necesidad de desarrollar el simulador del robot y la trayectoria, puesto que adquirirían las competencias necesarias durante el desarrollo del curso. El maestro les describió dos guías metodológicas: una relacionada con la trayectoria y otra con el robot.

Las tareas de los alumnos fueron las siguientes:

1) Se integraron en equipos de trabajo conformados por cuatro integrantes.

2) Recopilaron información inicial acerca de los modelos de robots y trayectoria; esto es, consultaron tesis, artículos e informes técnicos con el propósito de decidir las delimitaciones del proyecto y para realizar un plan de trabajo.

Finalmente, los alumnos y el profesor decidieron desarrollar el modelo y el simulador de la trayectoria, puesto que el modelo cinemático del robot cartesiano requería de conocimientos que implicaban más tiempo y más complejidad.

5.2 Planificación

La fase de planeación en el ABProy es crítica. Las tareas del profesor en esta fase se describen a continuación:

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

1) Revisar el plan de trabajo entregado por los alumnos, 2) Asesorar a los grupos de trabajo sobre la metodología que se utilizará para el desarrollo del simulador de trayectoria, 3) Señalar y ubicar asesores internos y externos que ayuden en algunas actividades especiales, 4) Planificar reuniones periódicas con cada equipo de trabajo revisar los avances o aclarar dudas y 5) Diseñar las evaluaciones de los aprendizajes.

Las tareas de los alumnos fueron las siguientes:

- Con los requerimientos de la empresa, la propuesta metodológica del profesor, la consulta con los alumnos de semestres avanzados responsables del diseño, construcción y control del robot y con la información preliminar consultada, los alumnos desarrollaron y entregaron un plan de trabajo sistematizado con las siguientes tareas:

a) Proponer las características cinemáticas de la trayectoria.

b) Modelar y programar los perfiles de trayectoria.

c) Modelar y programar los lugares geométricos de la trayectoria.

d) Generar el simulador de trayectorias.

- los alumnos negociaron entre sí la organización de los equipos de trabajo tomando en consideración los intereses personales y las habilidades de cada integrante.

5.3 Realización

Tarea 1: Características cinemáticas de la trayectoria.

La primera tarea que desarrollaron los alumnos fue la de diseñar la trayectoria. Esta actividad fue asesorada por el profesor y alumnos de semestres avanzados. Fue necesario activar el conocimiento previo en los alumnos en conceptos básicos de Física para poder diseñar los lugares geométricos y perfiles de trayectoria. La Figura 1 muestra las características geométricas de la trayectoria del robot propuestas por los alumnos. La descripción es la siguiente: En el punto **A** se localiza la herramienta de trabajo e inicio del ciclo de trayectoria. El robot se traslada del punto **A** al punto **B**, y luego al punto **C** en donde en un determinado tiempo realiza el sembrado en el primer almacigo. Posteriormente, el robot parte de la posición **C** a la posición **E** pasando por **B** y **D**. En el punto **E** se realiza la segunda operación de sembrado. Puesto seguido, el robot se desplaza al punto **G** pasando por los puntos **D** y **F** en donde realiza la tercera operación de sembrado. Finalmente, el robot regresa al punto **A** pasando por los puntos **F** y **H**, respectivamente.

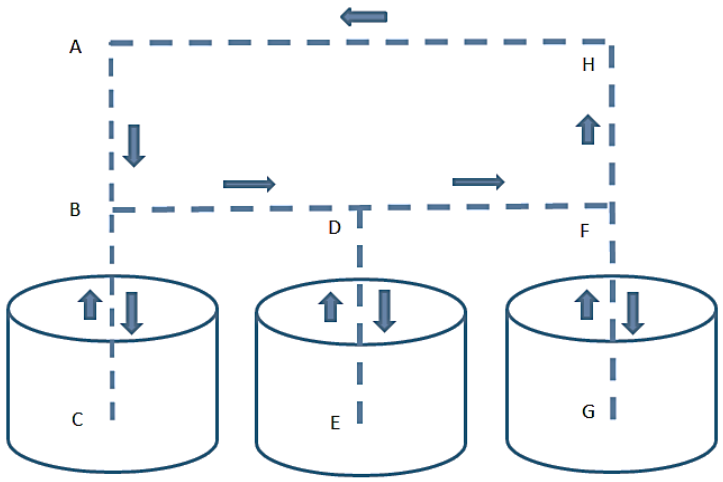


Figura 1. Lugar geométrico de la trayectoria.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

La Figura 2 muestra la configuración de un posible perfil de velocidades relacionado con el lugar geométrico mostrado en la Figura 1. Todos los tramos del perfil son líneas rectas. En el punto **A** la velocidad es V0, al final del tramo **A-B** la velocidad es V1, al final del tramo **B-C** la velocidad es V0. El periodo de tiempo comprendido entre t2 y t3 es de dos segundo (tiempo en el cual se realiza el sembrado), dicho periodo es el mismo entre t5 y t6 y, t8 y t9. Al final del tramo **C-B** la velocidad es V2, posteriormente en el tramo **B-E** la velocidad es V0 (nótese que el punto **D** se localiza entre los tramos **B-E**). Al igual que los tramos **C-B** y **C-E** (pasando por **D**), los tramos **E-D** y **D-G** (pasando por **F**) y **G-H** y **H-A**, son similares.

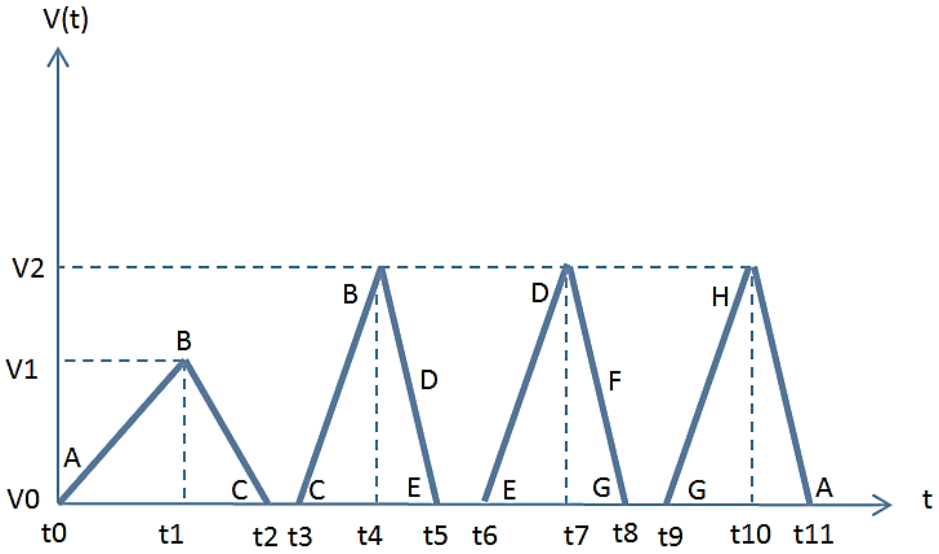


Figura 2. Perfil de velocidades propuesto.

Tarea 2: Modelación y programación de los perfiles de trayectoria.

Esta tarea consistió en analizar el perfil de velocidades y generar: 1) La función de velocidad, la función y gráfica de aceleraciones y 3) La función y gráfica del desplazamiento. Los alumnos usaron conocimientos básicos de funciones y de cálculo integral y diferencial para lograr la modelación de los perfiles de trayectoria. Para la programación de los modelos los alumnos decidieron utilizar el paquete de cálculo simbólico MATLAB para lo cual un alumno de semestre avanzado les dio un curso introductorio. Cabe mencionar que los perfiles trapezoidales de trayectoria como el mostrado en la Figura 2, generan perfiles de aceleración y desplazamiento discontinuos por lo que se tuvo la necesidad de utilizar métodos de interpolación. Los alumnos investigaron y decidieron utilizar interpolación polinomial para eliminar las discontinuidades. Para implementar la interpolación, los alumnos recordaron conocimientos sobre polinomios de grado 5, matrices y solución de sistemas de ecuaciones lineales. La Figura 3 muestra los perfiles interpolados.

Tarea 3: Modelar y programar los lugares geométricos de la trayectoria.

Para realizar esta tarea, los alumnos utilizaron conocimientos de Cálculo Vectorial tales como: vectores, funciones vectoriales, derivadas de funciones vectoriales y números directores, para modelar los lugares geométricos de la trayectoria. La Figura 4 muestra la programación de los mismos en MATLAB.

Tarea 4: Generar el simulador de trayectorias.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Los alumnos relacionaron las funciones de los perfiles de trayectoria con los modelos de los lugares geométricos. Los modelos finales fueron programados en MATLAB. La Figura 5 muestra el simulador de trayectorias.

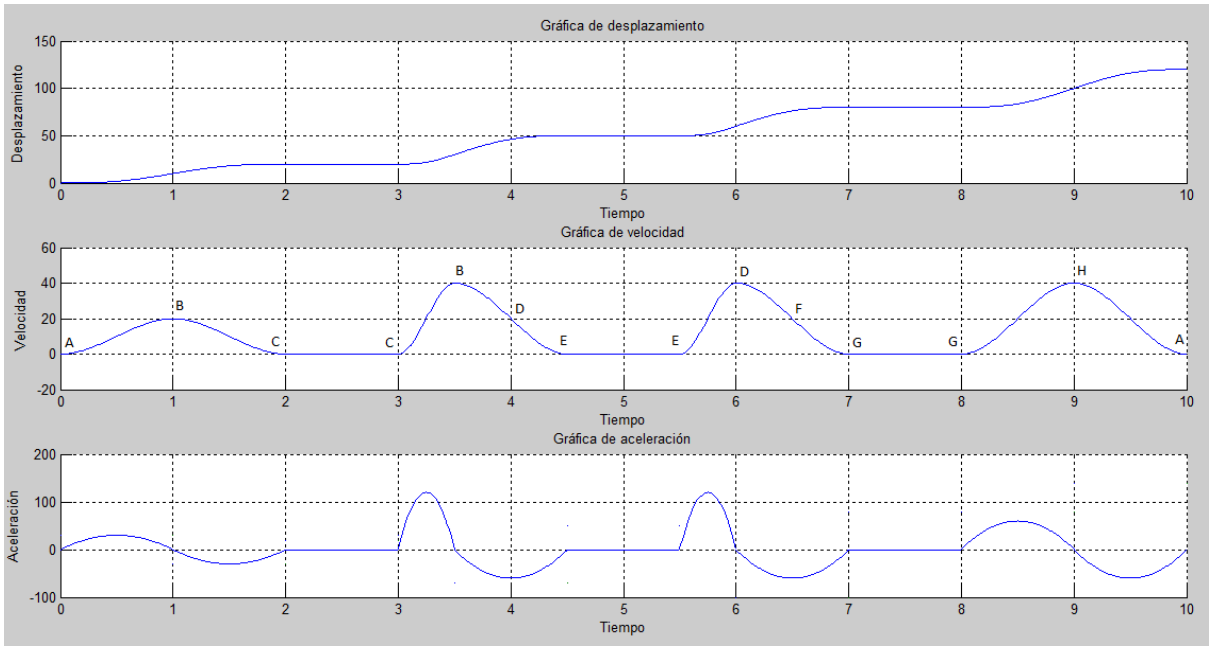


Figura 3. Perfiles suavizados de trayectoria con interpolación polinomial.

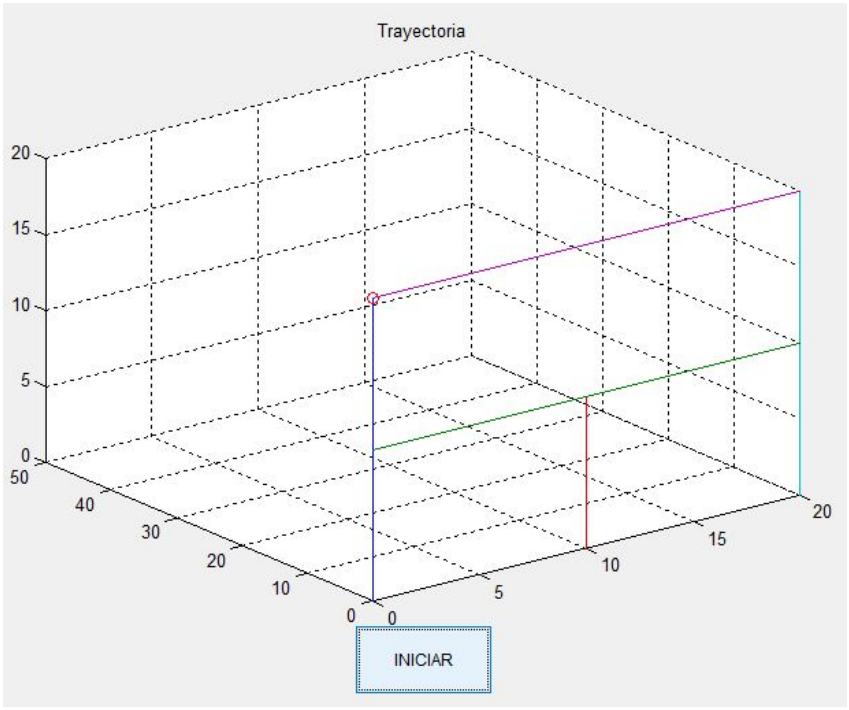


Figura 4. Lugares geométricos.

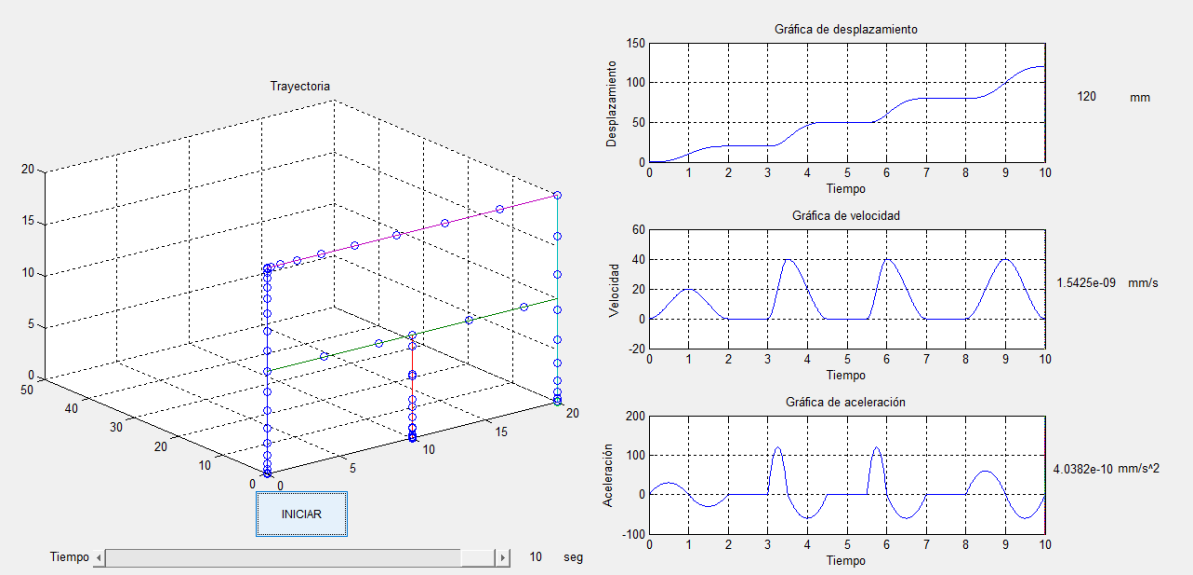


Figura 5. Simulador de trayectorias.

5.4 Evaluación

La evaluación de los desempeños de los alumnos es una tarea muy importante en el ABProy. En esta fase el profesor evaluó a los alumnos de dos maneras:

1) Durante el proceso.
2) Evaluación final.

Las técnicas para la evaluación fueron: Asistencia a las asesorías con el profesor y con los alumnos de semestres avanzados, participación en actividades en el aula, exámenes parciales, proyecto de investigación final por escrito, exposición de proyectos y examen final. En cuanto a los instrumentos de evaluación, se consideraron los siguientes: rúbricas, lista de control, valoración y matrices de valoración por pares. Los porcentajes de las evaluaciones fueron los siguientes: 50% a todas las actividades referidas al proyecto (60% a la funcionalidad del simulador y 40% a las actividades restantes) y 50% a los exámenes (70% a los exámenes parciales y 30% al examen final).

6. Conclusiones

En este artículo se describió una aplicación del ABProy en la materia de Cálculo Vectorial. Las principales conclusiones se resumen en los puntos siguientes:

- El diseño del proyecto a realizar por medio de los alumnos es crucial para la implementación del ABProy. Este debe ser atractivo, práctico, útil y que represente un verdadero reto. El diseño, modelación y la simulación de trayectorias requirió de un gran esfuerzo por parte de los alumnos, al necesitarse tareas de investigación, consulta con alumnos de semestres avanzados, autoorganización y trabajo de integración entre las matemáticas y la computación.
- No es una tarea sencilla trabajar con proyectos industriales en materias como Cálculo Vectorial, pues no todos los proyectos requieren de los conocimientos del programa de estudios y es necesario evaluar qué conocimientos se necesitan y diseñar una estrategia didáctica que permita el aprendizaje básico de los temas del curso y el desarrollo del proyecto. Para la realización del simulador de trayectorias se utilizó sólo el conocimiento de una unidad de

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

competencias de la materia de Cálculo Vectorial (aquella relacionada con vectores, operaciones con vectores, funciones vectoriales y derivación vectorial).

- El ABProy es una metodología activa que permite sistematizar las clases en torno a un proyecto. Su utilización es importante en matemáticas, pues ayuda al profesor a motivar a los alumnos al aprendizaje de temas que anteriormente no le encontraban conexión con problemas reales; permite además que los alumnos creen conocimiento en torno al proyecto y tengan una participación activa y emotiva. Coloca al profesor en el papel predominante de facilitador y guía, lo que permite una nueva, diferente y mejor comunicación con los alumnos. El ABProy también coloca al alumno en una posición en donde el aprendizaje verdadero depende de sus tareas y actividades, es decir, es el alumno el responsable mayor de su aprendizaje. Para el desarrollo del simulador de trayectorias el profesor ayudó a los alumnos en las tareas y actividades en las cuatro fases del ABProy. Sin embargo, los alumnos jugaron un papel mayor y preponderante, al investigar temas nuevos requeridos para el proyecto, llevar un curso de MATLAB extra-clase, recordar conocimiento previo y en programar los modelos matemáticos.
- La metodología del ABProy permite explorar nuevas formas de evaluar los aprendizajes de los alumnos. Los exámenes que tradicionalmente eran los instrumentos centrales para evaluar conocimientos en matemáticas, ahora forman parte de todo un sistema de evaluación en donde se valora el producto final de un proyecto, la búsqueda de conocimientos, la investigación, la asesoría y la defensa y la exposición del proyecto.
-

Referencias

[1] Fernández F., Duarte J. *"El Aprendizaje basado en Problemas como Estrategia para el Desarrollo de Competencias Específicas en Estudiantes de Ingeniería". Formación Universitaria.* Vol. 6 (5), 29-38. 2013.

[2] Regalado A., Cid M., Báez J. *"Problem based learning (PBL) : Analisys of continuous stirred tank chemical reactors with a process control approach". International Journal of Software Engineering & Applications (IJSEA)*, 1(4), 54-73. 2010.

[3] García J. *"Reflexiones sobre los estilos de aprendizaje y el aprendizaje del cálculo para ingeniería". Revista Electrónica "Actualidades Investigativas en Educación".* Vol 13. P.p 1-28. 2013.

[4] Chaterrjee A. Mathematics in engineering. Current Science, 88(3). 2005. [Online]. Available : www.ias.ac.in/currsci/feb102005/405.pdf

[5] García R. *"Ingeniería, matemáticas y competencias". Revista Electrónica "Actualidades Investigativas en Educación"*, vol. 14, núm. 1, pp. 1-29. 2014.

[6] Idris, Noraini. *"Enhancing students understanding in calculus trough writing"*. International Electronic Journal of Mathematics Education, 4(1), 36-55. 2009. [Online]. Available : www.iejme.com/012009/d3.pdf

[7] Jiménez E., Ferrer A., Soto E., Ochoa F,. Martínez V., Galindo F., *"The Profile of the New Engineer: Appied-Physicist-Mathematician-Information Technologist", International Conference on Engineering Education*. MD5-6 a MD5-8., San Juan, Puerto Rico. 2006.

[8] Han, S. Y., Capraro, R. M., & Capraro, M. M. *"How science, technology, engineering, and mathematics (STEM) project based learning (PBL) affects high, middle, and low achievers differently: The impact of student factors on achievement". International Journal of Science and Mathematics Education*, 1-25. 2014.

[9] Sunyoung H., Bugrahan Y., Mary M. Capraro,. Capraro R. *"In-service Teachers' Implementation and Understanding of STEM Project Based Learning". Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education*, 11(1), 63-76. 2015.

[10] Alzate E., Montes J., Escobar R. *"Diseño de actividades mediante la metodología ABP para la Enseñanza de la Matemática". Scientia et Technica Año XVIII*, Vol. 18, No. 3, 2013.

[11] Jiménez E., Bojórquez G., Navarro L., Amavizca L., López L., Martínez V., López S., Hernández M. *"Experiencias de la aplicación del Aprendizaje Basado en Proyectos de la materia de Mecanismos en la ULSA Noroeste". Eleventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI)*. Cancún, México. 2013.

[12] Badía A., García C. (2006). *"Incorporación de las TIC en la enseñanza y el aprendizaje basados en la elaboración colaborativa de proyectos". RUSC. Revista de Universidad y Sociedad del Conocimiento,* 3(2), 42-54. [Online]. Available: http://www.uoc.edu/rusc/3/2/dt/esp/badia_garcia.pdf

[13] De Miguel M. "Modalidades de enseñanza centradas en el desarrollo de competencias. Orientaciones para promover el cambio metodológico en el Espacio Europeo de Educación Superior" (Proyecto EA2005-0118). España: Universidad de Oviedo. 2005.

[14] Huber L. *"Aprendizaje activo y metodologías educativas". Revista de Educación*, número extraordinario Tiempos de cambio universitario en Europa, 59-81. 2008. [Online]. Available: http://www.duoc. cl/cfd/docs/aprendizaje-activo-metodologias-ducativas.pdf

[15] Barrio R, Blanco E., Martínez J., Galdo M. *"El aprendizaje orientado a proyectos en Mecánica de Fluidos a través de la experimentación con cohetes de agua. Red-U". Revista de Docencia Universitaria*. Número 2. 2010. [Online]. Available: http://www.um.es/ead/Red_U/?/.

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

37. Diseño de control de velocidad con realimentación de estados para turbina de planta solar

Hernández Gutiérrez Alicia, Toledano Ayala Manuel

ahernandez193@alumnos.uaq.mx;

Facultad de ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro
Cerro de las campanas S/N. Las campanas, 76010 Querétaro, Querétaro, México.

Resumen

En este artículo se presenta el desarrollo del diseño de un controlador de velocidad en el eje de salida de una turbina usando realimentación de estados espacio; esta turbina que forma parte de una central termosolar que usa el ciclo Brayton. Por medio del control propuesto se encontró un vector K capaz de modificar los polos del sistema para mejorar la respuesta transitoria del sistema evitando el sobrepaso evitando el problema de regulación. Los resultados que se presentan fueron obtenidos mediante simulaciones en Matlab, donde se encontró una configuración de polos que tienen parte real negativa para asegurar la estabilidad del sistema además se buscó que volvieran al sistema sobreamortiguado.

Palabras clave: Central termosolar; Control; Espacio de estados; Turbina.

1. Introducción

Actualmente la demanda energética ha crecido ampliamente y se ha visto en la necesidad de reemplazar las fuentes de combustibles fósiles por otras menos contaminantes [1], debido a esto ha sido necesario desarrollar nuevas tecnologías para la generación de energía eléctrica, como por ejemplo el aprovechamiento de la energía solar [2-4].

Las tecnologías para aprovechar la energía solar se dividen en dos grupos:

1. Sistemas de generación fotovoltaica como las celdas solares conectadas entre si para formar paneles solares.
2. Sistemas fototérmicos cuya característica principal es usar los rayos del sol que inciden sobre una superficie para calentar un fluido; como ejemplos de estos sistemas se tiene a los calentadores solares, los concentradores solares de potencia (CSP), los sistemas de cilindro parabólico, sistemas de concentración de torre, sistemas fresnel.

Los sistemas de concentración solar de torre, en el centro tienen una torre y en lo alto de ésta se ubica un colector que es una superficie donde un conjunto de espejos planos que siguen la trayectoria solar (heliostatos) reflejan los rayos del sol produciendo un calentamiento en el colector. El colector posee un sistema de tuberías por donde circula el fluido caliente que pone en marcha una turbina-generador [6-7].

Para conseguir el desempeño óptimo de los sistemas de concentración solar es necesario elegir el procedimiento de control adecuado y los equipos de control correctos. El control para obtener una salida constante en la turbina debe ser capaz de afrontar los siguientes disturbios del sistema:

1. Degradación en las propiedades térmicas del fluido.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

2. Problemas de reflexión de los heliostatos sobre el colector.
3. Cambios en las condiciones de operación como los factores climáticos y el deterioro de los equipos.

Algunos trabajos para evitar estos disturbios proponen modelos de control predictivo como un control difuso para la transferencia de calor en el fluido, basado en métodos teóricos y prácticos en el funcionamiento de la central termosolar, con los que se ha obtenido buenos resultados sin embargo el costo computacional es elevado, además que se requiere conocimientos prácticos de expertos [1].

La aplicación de controladores PID sintonizados por métodos tradicionales como Ziegler-Nichols para aplicaciones CSP ha producido inestabilidad en el sistema debido a las variaciones de la radiación solar; para corregir estos problemas se han implementado controladores PID combinados con controladores feedforward para disminuir el efecto causado por las perturbaciones medibles.

Otros estudios han implementado estrategias de control de asignación de polos de ganancia programada en una CSP a escala, los resultados que obtuvieron fue una respuesta adecuada ante las no linealidades del sistema [8].

El objetivo de este trabajo es el diseño de control en espacio de estados por la técnica de realimentación de estados capaz de encontrar una ganancia programada, usando una configuración de asignación de polos para mejorar la respuesta transitoria del sistema.

Se presenta primeramente el sistema físico del la turbina, para posteriormente establecer el modelo en espacio de estados del sistema; una vez obtenido éste se realiza un análisis de controlabilidad y se describe a detalle el desarrollo del control en espacio de estados, para finalmente hacer una discusión sobre los resultados obtenidos.

2. Desarrollo

El sistema controlado consta de un colector solar que se encarga de recibir la radiación solar reflejada hacia él por un sistema de espejos planos que siguen la trayectoria solar (heliostatos), un sistema de tuberías por donde circula el fluido de trabajo a altas temperaturas hacia las aspas de la turbina como se aprecia en la figura N° 1, y un generador (carga) conectado al eje de la turbina conectado por medio de una caja de engranes.

Figura 1. Sistema de la turbina.

El colector solar es una plancha hueca de acero que en su interior contiene un sistema de tuberías como se ve en la figura N° 2; cuando los heliostatos reflejan la luz solar sobre él, su temperatura aumenta produciendo que el calor se transfiera al fluido que se encuentra dentro de las tuberías; al calentarse el fluido en un volumen constante su presión aumenta provocando que el gas haga girar las aspas de la turbina. Estas aspas están conectadas mecánicamente a un eje llamado de alta velocidad que a su vez esta acoplado a una caja de engranes cuyo propósito es reducir la velocidad y aumentar el torque de entrada hacia otro eje que va conectado directamente a la carga, es decir, el generador.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Figura 2. Colector solar y turbina.

A continuación se presenta la nomenclatura:

B_e Amortiguamiento equivalente.
J_L Momento de inercia de la carga.
J_T Momento de inercia de la turbina.
k_e Rigidez equivalente del sistema.
N Relación de caja de engranes.
τ_A Torque de entrada.
ω_{Te} Velocidad angular del eje de alta velocidad.
ω_L Velocidad angular del eje de baja velocidad.
θ_{Te} Posición angular del eje de alta velocidad.
θ_L Posición angular del eje de baja velocidad.
θ_e Diferencia entre la posición del eje de alta velocidad con respecto al de baja velocidad.

2.1 Modelo dinámico de la turbina

De acuerdo a la figura N° 1, se distinguen los siguientes componentes principales de la turbina:

1. Paletas o álabes.
2. Eje de baja velocidad.
3. Caja de engranes.
4. Eje de alta velocidad.

Donde el eje de alta velocidad corresponde al acoplamiento mecánico entre las paletas de la turbina y la caja de engranes; y el eje de baja velocidad es un eje que trasmite el movimiento desde la caja de engranes hasta la carga, para el caso un generador.

El sistema fue modelado como un sistema homólogo que consiste en dos masas, un eje flexible y una constante de fricción viscosa equivalente (Figura 3).

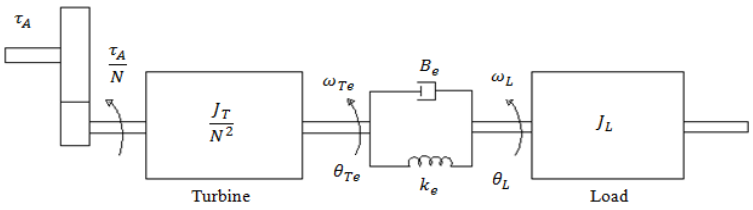


Figura 3. Sistema equivalente de la turbina.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Usando los tres elementos que almacenan energía como variables de estado, es decir, las velocidades angulares de cada uno de los ejes y la diferencia de posición entre los ejes.

La parte mecánica de la turbina puede modelarse de acuerdo con la segunda ley de Newton:

$$\sum_{i=1}^{n} \tau_i = J\dot{\omega} \tag{1}$$

Donde τ_i son los torques, J es el momento de inercia, $\dot{\omega}$ es la velocidad angular y n es el número de torques presentes en el sistema [8]. De la figura N° 3, encontramos que:

$$\frac{\tau_A}{N} - B_e\left(\dot{\theta}_{Te} - \dot{\theta}_L\right) - k_e(\theta_{Te} - \theta_L) = \frac{J_T}{N^2}\ddot{\theta}_{Te} \tag{2}$$

$$B_e\left(\dot{\theta}_{Te} - \dot{\theta}_L\right) - k_e(\theta_{Te} - \theta_L) = J_L\ddot{\theta}_L \tag{3}$$

$$\theta_e = \theta_{Te} - \theta_L \tag{4}$$

$$\omega_{Te} = \dot{\theta}_{Te} \tag{5}$$

$$\dot{\omega}_{Te} = \ddot{\theta}_{Te} \tag{6}$$

$$\omega_L = \dot{\theta}_L \tag{7}$$

$$\dot{\omega}_L = \ddot{\theta}_L \tag{8}$$

Reescribiendo y reacomodando las ecuaciones (4, 5, 6, 7 y 8) se tiene que:

$$\dot{\omega}_{Te} = \frac{-B_e N^2}{J_T}\omega_{Te} + \frac{B_e N^2}{J_T}\omega_L - \frac{k_e N^2}{J_T}\theta_e + \frac{\tau_A N}{J_{Te}} \tag{9}$$

$$\dot{\omega}_L = \frac{B_e}{J_L}\omega_{Te} - \frac{B_e}{J_L}\omega_L + \frac{k_e}{J_L}\theta_e \tag{10}$$

$$\dot{\theta}_e = \omega_{Te} - \omega_L \tag{11}$$

Entonces el espacio de estados queda definido:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_{Te} \\ \dot{\omega}_L \\ \acute{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-N^2 B_e}{J_T} & \frac{N^2 B_e}{J_T} & \frac{N^2 k_e}{J_T} \\ \frac{B_e}{J_L} & \frac{-B_e}{J_L} & \frac{k_e}{J_L} \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{Te} \\ \omega_L \\ \theta_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{N}{J_T} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tau_A \tag{12}$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{Te} \\ \omega_L \\ \theta_e \end{bmatrix} \tag{13}$$

De las ecuaciones (12) y (13) puede observase que el sistema es lineal e invariante en el tiempo.

2.2 Desarrollo de control en espacio de estados.

La figura N° 4 presenta la estructura típica de un control por realimentación de estados, donde la señal de control es calculada a través del estado instantáneo [9].

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

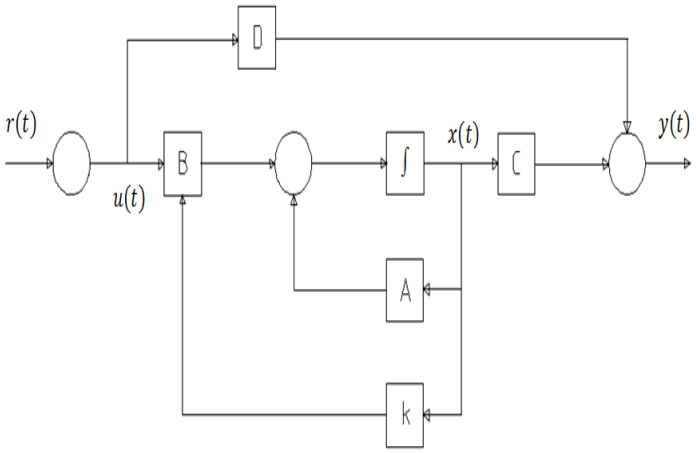


Figura 4. Estructura típica de un sistema lineal.

Considere el sistema lineal descrito por las ecuaciones (14) y (15):

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{14}$$

$$y = Cx \tag{15}$$

Donde:

$$A = \begin{bmatrix} -0.2349 & 0.2349 & 0.0143 \\ 0.7048 & -0.7048 & 0.0429 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1.1925 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \quad 1 \quad 0]$$

Los valores de las matrices A, B y C, se obtuvieron sustituyendo los parámetros $N = 1$, $B_e = 0.197$, $J_t = 0.8386$, $J_l = 0.2795$ y $k_e = 0.012$ en las ecuaciones (12) y (13).

Una parte importante es revisar si el sistema es controlable, por medio del siguiente procedimiento:

$$M = [B \quad AB \quad A^2B] \tag{16}$$

La matriz M se conoce como matriz de controlabilidad; para nuestro caso M es definida por la ecuación (17).

$$M = \begin{bmatrix} 1.1925 & -0.2801 & 0.2803 \\ 0 & 0.8405 & -0.7386 \\ 0 & 1.1925 & -1.1206 \end{bmatrix} \tag{17}$$

Si M tiene rango pleno, es decir, hay independencia lineal entre los elementos de la matriz M, entonces se dice que el sistema es controlable. El rango de la matriz presentada en la ecuación (17) es 3, entonces se dice que el sistema es controlable.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Para determinar el polinomio característico del sistema, se resuelve la ecuación (18).

$$|sI - A| \tag{18}$$

Donde I es la matriz identidad; entonces se obtiene el siguiente polinomio característico para el sistema:

$$s^3 + 0.9397s^2 + 0.0286 \tag{19}$$

Por lo tanto, los coeficientes son $a_1 = 0.9397$, $a_2 = 0.0286$, $a_3 = 0$. Para la elección de los polos deseados se reviso el lugar de las raíces del sistema original y se eligieron valores que permitieran mover los polos más a la izquierda del semiplano imaginario sin anular el cero del sistema y evitando que al alejarlos demasiado perdieran su contribución a la respuesta del sistema.

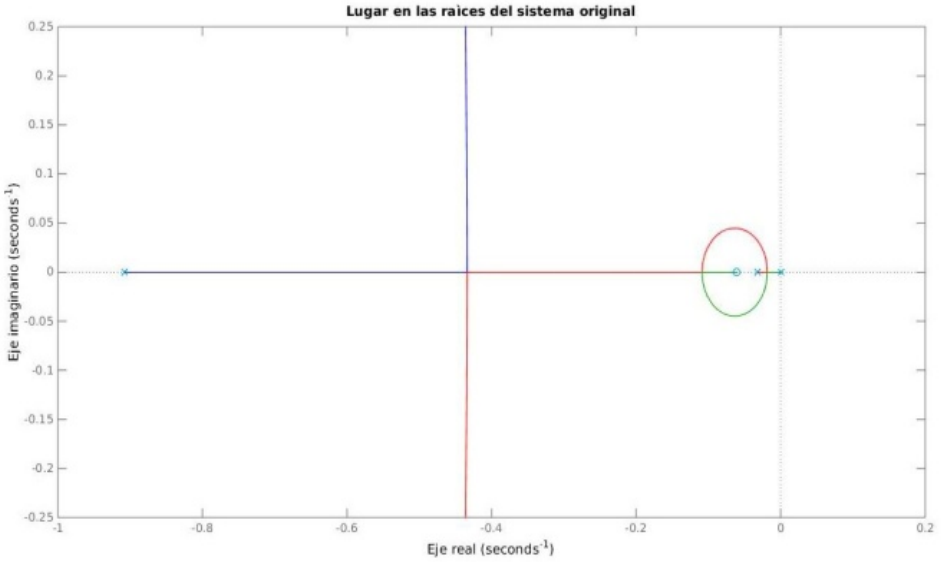


Figura 5. Lugar en las raíces del sistema original.

De acuerdo con la figura N° 5 se eligió que $p_{1,2} = -0.0187 \pm 0.00455j$ y $p_3 = -0.0929$; el polinomio característico de los polos deseados queda definido de la siguiente manera:

$$(s - p_1)(s - p_2)(s - p_3) = s^3 + 0.1303s^2 + 0.0038s \tag{20}$$

De la ecuación (20) se toman los coeficientes de polinomio para encontrar la matriz de ganancias K, determinada por:

$$K = [\alpha_3 - a_3 \quad \alpha_2 - a_2 \quad \alpha_1 - a_1]T^{-1} \tag{21}$$

Donde $\alpha_1 = 0.1303$ $\alpha_2 = 0.0038$, $\alpha_3 = 0$.

Resolviendo la ecuación (21) con los valores obtenidos de la ecuación (20).

$$K = [0 \quad -0.0248 \quad -0.8094]T^{-1} \tag{22}$$

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

La matriz T es definida por:

$$T = MW \tag{23}$$

La matriz W se encuentra por medio de los coeficientes del polinomio característico del sistema original:

$$W = \begin{bmatrix} a_2 & a_1 & 1 \\ a_1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{25}$$

Entonces T es:

$$T = \begin{bmatrix} 0.0512 & 0.8405 & 1.1925 \\ 0.0512 & 0.8405 & 0 \\ 0 & 1.1925 & 0 \end{bmatrix} \tag{26}$$

La matriz inversa de T es:

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 19.5324 & -13.7670 \\ 0 & 0 & 0.8386 \\ 0.8386 & -0.8386 & 0 \end{bmatrix} \tag{27}$$

Entonces la matriz K queda definida por:

$$K = [-0.6788 \quad 0.6795 \quad -0.0213] \tag{28}$$

Ahora se calculan los matrices de estado para el sistema compensado:

$$\hat{A} = A - BK \tag{29}$$

$$u = -Kx \tag{30}$$

$$\hat{B} = -BKx \tag{31}$$

Finalmente el sistema compensado es definido por:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0.5745 & -0.5753 & -0.0397 \\ 0.7048 & -0.7048 & 0.0429 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1.1925 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \tag{32}$$

$$y = [0\ 1\ 0]x \tag{33}$$

3. Resultados

Como se aprecia en la figura N° 5, se presenta el análisis del lugar geométrico de las raíces del sistema original. Recuerde que si los polos están lejos del eje imaginario producen que el sistema en lazo cerrado sea estable, en la figura N° 5, existen tres polos y un cero, donde uno de los polo está en el origen y dos ceros en el infinito.

Después modificar la ubicación de los polos mediante la técnica propuesta se obtuvo la siguiente representación del lugar de las raíces como se observa en la figura N° 6.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

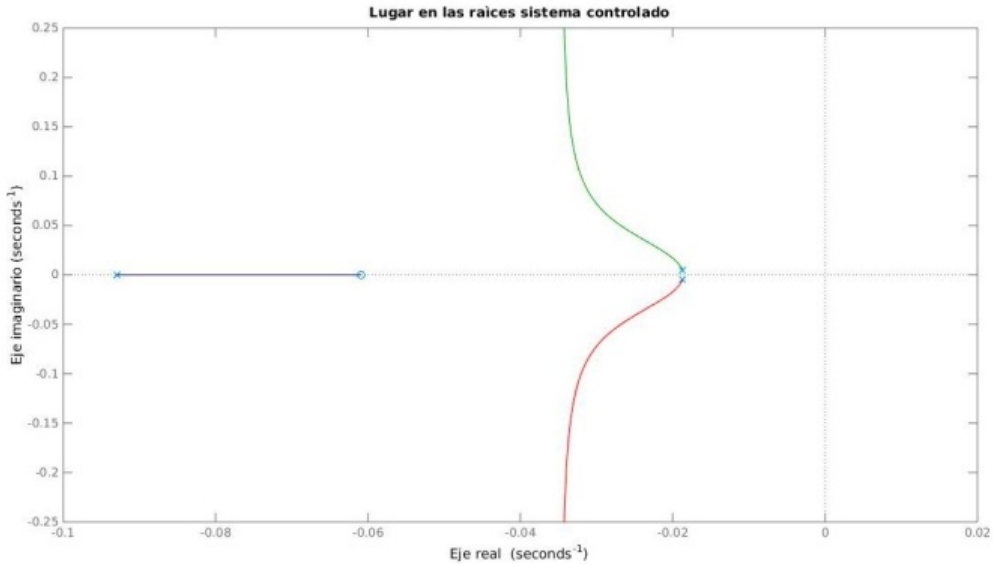


Figura 6. Análisis de estabilidad para el sistema controlado.

En la figura anterior, se aprecia cómo se han movido los polos, de esto puede concluirse que los polos complejos conjugados al tener una componente imaginaria con valores cercanos a cero se mantiene las oscilaciones del sistema en rangos pequeños y la ubicación del cero fuera del origen se asegura que el sobrepaso no sea muy alto.

Finalmente, en la figura N° 7, se muestra la respuesta del sistema a una entrada escalón de 1500 rad/s; en ella puede apreciarse como el sistema no tiene sobrepaso y su comportamiento es similar aún sistema de segundo orden sobreamortiguado.

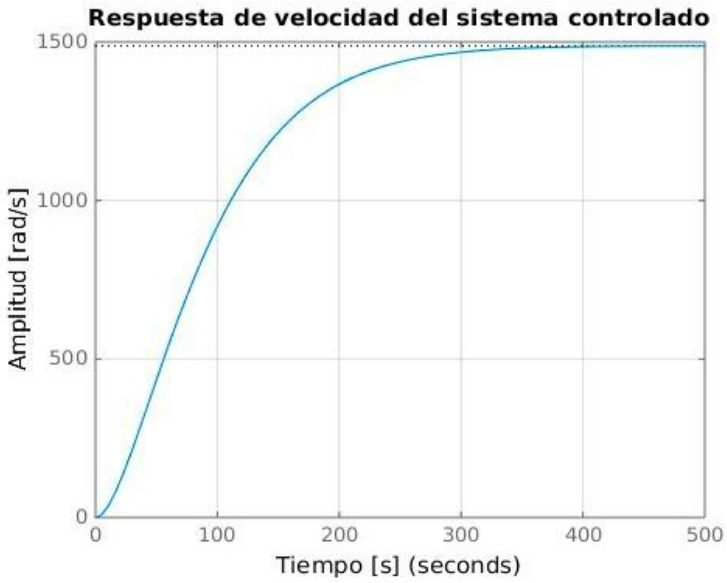


Figura 7. Respuesta de velocidad para una entrada escalón.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Por último, en la figura N° 8 se presenta una imagen comparativa de la velocidad del sistema controlado contra el sistema sin controlar, en ella se aprecia que el sistema controlado converge rápidamente al valor deseado de la consigna mientras que el sistema sin control diverge gravemente.

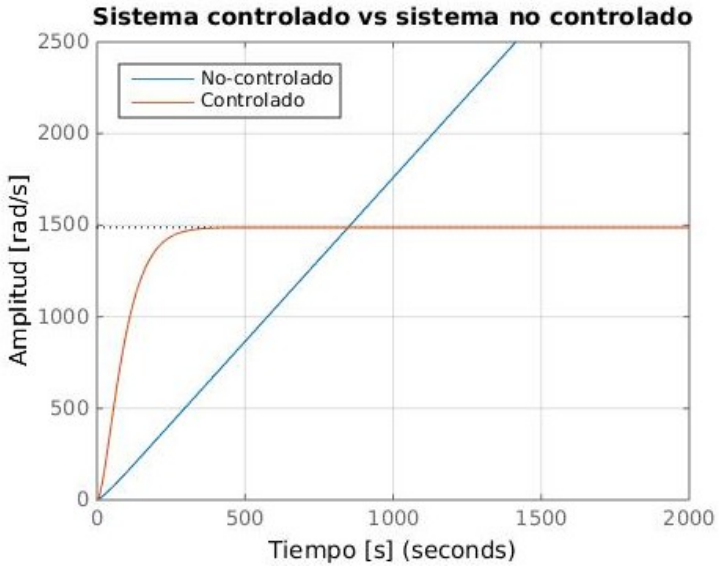


Figura 8. Comparativa del sistema controlado y sin controlar.

4. Conclusiones

El control de velocidad mediante el realimentación de estados permite hacer control para sistemas MIMO (sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas) además de permitir llevar a la estabilidad a un sistema inestable, con solo calcular un vector de ganancias K, y modificar los polos del sistema para mejorar la respuesta del sistema.

Es importante recalcar que una mala asignación de los polos puede producir inestabilidad en el sistema, por eso fue importante conocer el lugar de las raíces para proponer adecuadamente los valores de los polos deseados.

En este trabajo la asignación de polos fue enfocada en garantizar que el sistema se comportará sobreamortiguadamente porque al tener sobrepasos altos la energía requerida para la ley de control aumenta, y de esta manera se logró alcanzar la consigna de control sin sobrepasos ni oscilaciones, como se ve en las figuras N° 7 y N° 8.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado para la realización de esta investigación.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Referencias

[1] K. Azizian, M. Yaghoubi, I. Niknia and P. Kanan, *"Analysis of Shiraz Solar Thermal Power Plant Response Time"*, in Journal of Clean Energy Technologies, vol. 1(1), Eds: Iran, 2013, 22-26 pp.
[2] E. D. Frank, J.L. Sullivan and M. Q. Wang, *"Life cycle analysis of geothermal power generation with supercritical carbon dioxide"*, in Enviromental Research Letters, vol. VII, Eds. USA:Academic, 2012, pp. 10-21.
[3] L. Spitalny, D. Unger, J.M.A. Myrzik, "*Potencial of small Hydro Power plants for Delivering Control Energy in Germany"*, in IEEE, vol. 12, Eds. Dortmund: Academic, 2012, 1-6 pp.
[4] P.Shipkovs, K. Lebedeva, G. Kashkarova, L. Migla and M. Pankars, *"Investigation of Solar Collector systems use in Latvia"* in Solar Thermal Applications, vol. 14, pp. 3694-3701, May, 2011, [World Renewable Energy Congress 2011, Sweden].
[5] J. Henriques, P. Gil, A. Cardoso, P. Carvalho, A. Dourado, *"Adaptive neural output regulation control of a solar power plant"* in Control Engineering Practice, vol. 18(2010), Eds. Caparica:Academic, 2010, pp. 1183-1196.
[6] *Energía Renovable*. http://www.anes.org/anes/index.php?option=com_wrapper&Itemid=11 (accessed on 27/08/2015)
[7] W. Sunz, J. Castellanos, C. Peraza, F. Arteaga, (2015, February 26), *"Modelacion y control en espacio de estados de un servomecanismo usando matlab"* [Online]. Available: http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/a8n1/8-1-5.pdf
[8] A. Fontalvo, J. Garcìa, M. Sanjuan, R. Vasquez Padilla. *"Automatic control strategies for hybrid solar-fossil fuel power plants"* in Renewable Energy, vol. 62(2014), Eds. Barraquilla:Academic, 2014, pp. 424-431.
[9] A. M. Hernandez Sanchez, "*Analisis, modelado y simulacion de la operacion de sistemas de generacion eoloelectrica basados en generadores de induccion tipo jaula de ardilla"*, M.S. thesis, D. Electronic Engineering, CENIDET, Cuernavaca, Mexico, 2008.
[10] K. Ogata , *"Ingeniería de control moderna"*, 3 ed, Mexico D.F, 1998, Prentice-Hall, pp. 843-848.

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

38. Controlador difuso auto-sintonizado para cojinete magnético de un grado de libertad

Santana Ramírez José de Jesús, Jáuregui Correa Juan Carlos

ravenelco@gmail.com, jc.jauregui@uaq.mx

División de Posgrado, Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Querétaro.
Cerro de las Campanas S/N, Las Campanas, 76010 Santiago de Querétaro, México.

Resumen

Se presenta un esquema de control PID auto sintonizado para un cojinete magnético de una sola bobina. La bobina fue caracterizada en base a datos experimentales.

Las ganancias α del controlador se obtienen mediante la parametrización de la formula de Ziegler-Nichols con un termino variable α , esta variable es ajustada mediante un controlador difuso en linea. El controlador difuso emplea el error y la taza de cambio del error como entradas, ajustando α de modo que se acelere la convergencia de la salida del proceso ala referencia y_d. El experimento muestra que el desempeño se ve mejorado considerablemente en términos de la referencia y la respuesta a entradas de perturbación se presenta un comparativo entre los métodos convencionales de control y el algoritmo únicamente sintonizados.

Palabras clave: Levitación, Ziegler-Nichols, PID, Fuzzy.

1. Introducción

La levitación magnética constituye una línea de investigación en desarrollo tanto académica como industrial, debido a las ventajas que proporciona, en especial, la sustentación sin rozamiento.

Como es una tecnología de soporte sin contacto, la suspensión magnética hace posible en cierto tipo de sistemas trabajar a altas velocidades de rotación, no requiere lubricación y opera en un régimen de no vibración, lo que proporciona una mayor vida util de los componentes de mecánicos, (R. Isermann). Estas características hacen que los sistemas de levitacion sean apropiados para máquinas herramientas de alta velocidad (Jen-Hsing Li), lugares de difícil acceso como transbordadores,sistemas de almacenamiento de energía y aplicaciones en las que es debe haber ausencia de lubricación.

Con todo esto, existen cada vez más, numerosas aplicaciones y las expectativas sobre esta tecnología han motivado la aparición de diversos trabajos sobre distintos aspectos como la eficiencia en el consumo energético , el control activo de vibración (Guevara, M.), el control no lineal y el control robusto (Arredondo, I. Jugo, J.). Este último tipo de control permite al dispositivo funcionar correctamente frente a cambios en su estado de operación debido a perturbaciones, calentamiento o derivas de los valores nominales de los parámetros en el tiempo.

Esta característica es fundamental para varias de las aplicaciones mencionadas anteriormente (en transbordadores espaciales, implantes médicos, máquina herramienta).

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Las técnicas fuzzy hoy en día están siendo utilizadas en muchísimas aplicaciones mas a un en modelos tan complejos en donde definir un modelo lo mas aproximado posible se vuelve una tarea compleja, el comportamiento no lineal de los actuadores y las incertidumbres del modelo son claros ejemplos en donde las técnicas difusas se involucran como lo menciona (Chagas M.) en su investigación donde valida una metodología, basándose en un sistema digital y un control de corriente.

Algunas veces se opta por el entrenamiento de una red con el propósito de estimar la posición del entrehierro, el uso de estas técnicas puede ser un proceso lento y muy poco aplicable si se desea hacerlo en linea como menciona (Rairan J.) el cual utiliza un sensor óptico para realizar su experimento.

2. Modelado del sistema de levitación

Por su naturaleza el sistema de levitación que solo involucra un electroimán contiene los siguientes parámetros (Hernandez V.)

- Una entrada de voltaje que denominaremos *u* (variable de control).
- La corriente eléctrica *i* generada por el voltaje de entrada.
- Para Denotar la posición de la esfera y el electroimán se usara *y*.
- *F* sera la fuerza magnética que ejerce el electroimán sobre el rotor.
- *m* es la masa del rotor.
- *L(y)* representara la inductancia del electroimán, la cual variara con la posición del rotor (caracterización del sensor inductivo).
- R es la resistencia de la bobina.
- *λ* es el flujo magnético el cual esta dado por la relación:

$$\lambda = L(y)i \tag{1}$$

Figura 1. Cojinete magnético.

El valor de la fuerza electromagnética lo encontramos mediante el gradiente de la co-energía magnética.

$$\overrightarrow{f_{mag}} = \nabla \overrightarrow{W_m} = \left(\frac{\partial W_{mx}}{\partial y}, \frac{\partial W_{my}}{\partial y}, \frac{\partial W_{mz}}{\partial y}\right) \tag{2}$$

En nuestro caso, estudiaremos un solo único grado de libertad, por tanto solo nos interesa la fuerza electromagnética generada $\overrightarrow{f_{mag}}$ en una dirección.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

$$\overrightarrow{f_{mag}}=i^2\frac{\partial L(y)}{2\partial y} \quad (3)$$

Reescribiendo nos queda

$$F(i,y)=i^2\frac{\partial L(y)}{2\partial y} \quad (4)$$

La inductancia se modela de acuerdo a la aplicación de Leyes de Ampére y Faraday

$$L(y)=L_i+\frac{L_0 y_0}{y} \quad (5)$$

donde L_i es la inductancia de electroimán en ausencia del objeto levitado y L_0 es la inductancia adicional generada por el objeto levitado en la posición y_0 .

Finalmente uniendo las ecuaciones (2) y (3) obtenemos

$$\overrightarrow{f_{mag}}=\frac{L_0 y_0}{2}\frac{i^2}{y^2}=k\frac{i^2}{y^2} \quad (6)$$

El estudio de la mecánica del cojinete magnético se basa en aplicar la segunda ley de Newton, que nos indica que la suma de fuerzas sobre un objeto es igual al producto de la masa del objeto por la aceleración del mismo

$$\sum F=m\frac{dv}{dt} \quad (7)$$

Teniendo en cuenta que únicamente tenemos un grado de libertad y que solamente estudiaremos la posición del objeto levitado (sin tener en cuenta los desplazamientos horizontales) obtenemos la siguiente expresión.

Aplicando la segunda Ley de newton a la camisa se tiene:

$$m\frac{d^2y}{dt^2}=F(i,y)+mg \quad (8)$$

usando (5) y (6) nos queda:

$$m\frac{d^2y}{dt^2}=\frac{1}{2}\frac{\partial L(y)}{\partial y}i^2+mg \quad (9)$$

2.1 Modelado del subsistema eléctrico

El circuito eléctrico que modela el comportamiento del cojinete es un circuito RL. Aplicando la ley de Kirchoff obtenemos la siguiente relación tensión-corriente.

$$m\frac{d^2y}{dt^2}=\frac{1}{2}\frac{\partial L(y)}{\partial y}i^2+mg \quad (10)$$

Note que se ha utilizado la ley de faraday para expresar la caída en la inductancia $\frac{\partial\lambda}{\partial t}$en este punto es importante saber como depende la inductancia de la posición de la esfera, se a sugerido que la inductancia este formada por la función:

$$L(y)=k_0+\frac{k}{1+\frac{y}{a}} \quad (11)$$

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

donde *a*, k_0 y *k* son constantes positivas. Además tanto k_0 y $k_0 + k$ representan valores de la inductancia cuando la esfera no se encuentra y esta totalmente pegada al electroimán. Adicionalmente se debe cumplir la siguiente propiedad:

$$\frac{\partial L(y)}{\partial y} < 0 \tag{12}$$

a=$5x10^{-3}$ k=$3{,}5x10^{-3}$ k_0=$5x10^{-3}$

2.2 Modelado del subsistema mecánico

De acuerdo a la (Herbert H.) necesitamos una fuerza electromotriz, escribimos en términos de la co-energía magnética y la ecuación (1)

$$W = \int_0^i \lambda\,(i, y)\,di \tag{13}$$

Sustituyendo el valor del flujo magnético en términos de la corriente y la posición y evaluando obtenemos

$$F_e = -\frac{1}{2}\frac{\partial L(y)}{\partial y} i^2 \tag{14}$$

Uniendo el sistema mecánico y eléctrico se obtiene el modelo

$$F_e = -\frac{1}{2}\frac{\partial L(y)}{\partial y} i^2 \tag{15}$$

$$\frac{dy}{dt} = v \tag{16}$$

$$\frac{dv}{dt} = g - \frac{1}{2m}\frac{\partial L(y)}{\partial y} i^2 \tag{17}$$

3. Diseño de controlador difuso

A pesar de las nuevas técnicas de control desarrolladas se sigue empleando el PID para procesos industriales. Para sintonizar un PID se debe conocer el modelo de la planta y a partir de esta se calculan las ganancias del controlador k_p , k_i , k_d .

Teóricamente este tipo de controlador es adecuado para sistemas de primer y segundo orden, además de que dichas ganancias son fáciles de implementar.

Desafortunadamente no se pueden modelar siempre todos los modelos como sistemas de orden igual o inferior a 2 por lo que hace complicado utilizar en ciertos casos un controlador lineal como lo es el PID.

Se debe inicializar las ganancias del controlador PID antes de arrancar el proceso,(Braae, M.) para esto se realiza el cálculo mediante el criterio de Routh , de la ganancia k para que el sistema sea marginalmente estable.

También es posible hacerlo experimentalmente, aunque quizás no es recomendable, se puede encontrar una ganancia de un controlador proporcional que haga oscilar el sistema.

Debido a que se está trabajando con un sistema electromecánico, la parte eléctrica es mucho más rápida que la mecánica es por eso que se divide el diseño en dos controladores uno de corriente y el otro de posición, esto se justifica si tenemos en cuenta que la entrada de control es el voltaje y la salida es la posición, lo que significara que circulara mayor corriente en la bobina si la esfera se aleja de la posición base.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

El diseño por separado no significa que el sistema tenga respuestas separadas, pues el controlador PID necesita conocimiento de las ganancias PI lo que significara alejar mas sus polos para garantizar rapidez en el sistema eléctrico y la corriente alcance su referencia.

3.1 Parámetros para inicializar el PID

La función que nos representa un controlador PID estará expresada por

$$G(s)=\frac{K_d s^2+K_p s+K_i}{s} \tag{18}$$

Como se mencionó si el controlador de corriente es lo suficientemente rápido la parte mecánica, se procese a encontrar la ganancias máximas aplicables a la planta para que sea utilizada está en la fórmula de Ziegler- Nichols (Ogata K.). Localizando los polos del sistema en lazo cerrado obtenemos que

$$s_1=0$$
$$s_2=-97{,}82+504{,}17j$$
$$s_3=-97{,}82-504{,}17j$$

Estos valores se obtuvieron de forma analítica para el sistema considerando el lazo de corriente y el polo dominante

$$G_p(s)=\frac{a}{s^2-b} \tag{20}$$

Las ganancias óptimas para el PID trabajando de esta forma serán

$$K_p=2{,}456$$
$$K_i=1{,}034$$
$$K_d=0{,}0027$$

Esto es en la forma convencional, es claro que es un proceso complicado y poco fiable por cualquier tipo de incertidumbre en el sistema, es por eso que se utiliza un método que nos permita calcular las ganancias y sintonice el controlador en forma más rápida

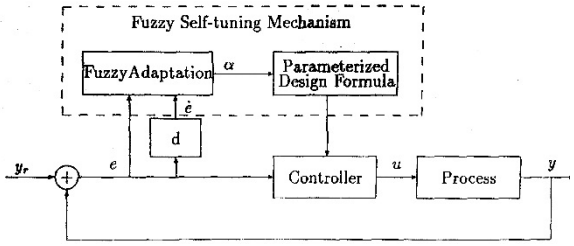


Figura 1. Diagrama de Sintonización

Los parámetros del PID están dados por las siguientes ecuaciones.

$$K_c=1{,}2\alpha K_{max} \tag{21}$$
$$T_i=0{,}75\frac{1}{1+\alpha}t_{max} \tag{22}$$
$$T_d=0{,}25T_i \tag{23}$$

Las entradas del controlador Fuzzy son el error y la derivada del error y la salida es el ajuste de α(t) (ver figura 2), donde α(t) es el ajuste de las ganancias el PID.

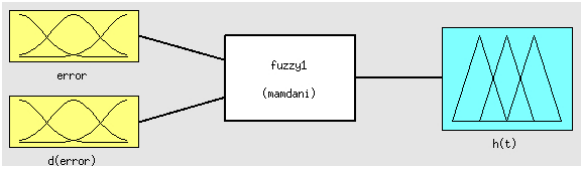


Figura 2. Bloque de funciones del algoritmo difuso.

Las variables simbólicas tanto del error *e* como de la derivada del error *ė* están dadas respectivamente por los siguientes vectores:

E = N L, N M, N S, Z, P S, P M, P L
R = N L, N M, N S, Z, P S, P M, P L

Se asignan las siguientes etiquetas

E = −3, −2, −1, 0, 1, 2, 3
R = −3, −2, −1, 0, 1, 2, 3

Entonces la matriz de reglas queda dada por

$$ExR=\begin{bmatrix} -3 & -3 & -2 & -2 & -1 & -1 & 0 \\ -3 & -2 & -2 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ -2 & -2 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 \\ -2 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 2 \\ -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ -1 & 0 & 1 & 1 & 2 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 \end{bmatrix} \quad (23)$$

análogamente a una matriz lineal la salida H estará dada por la diagonal principal

H = −3, −2, −1, 0, 1, 2, 3 (25)

La ultima etapa es la defuzzificación de H hacia h(t). Una vez obtenida h(t) se calcula de manera recursiva α como se indica en la ecuación siguiente

$$|x|=\{\alpha(t)+\sigma h(t)(1-\alpha(t))\ si\ \alpha(t)>0{,}5\} \quad (26)$$
$$|x|=\{\alpha(t)+\sigma h(t)\alpha(t)\ si\ x\leq 0\} \quad (27)$$

donde σpuede tener un valor entre [0,2 0,6]

3.1 Implementación del controlador Fuzzy.

Una vez calculado todas las ganancias iniciales del controlador PID se cargan a dicho controlador, se estima de manera constante *h(t)* para posteriormente mediante la función recursiva (26),(27) se calcule *α* para así calcular las nuevas ganancias del controlador PID y realizar el calculo de u(t) a partir de un nuevo error *e*.

El rango del error *e* se considera en el intervalo [−1 1] puesto que se trata de una respuesta al escalón unitario.

Mediante simulaciones se obtuvo que la derivada del error esta dentro del intervalo [−6 6]. y la salida de *h(t)* se considera de entre el intervalo [−0,5 0,5].

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

4. Análisis de resultados

Algunos resultados se obtuvieron mediante simulaciones del controlador Fuzzy en Matlab usando la herramienta de Simulink con una planta de 3er orden en cascada con un controlador PID.

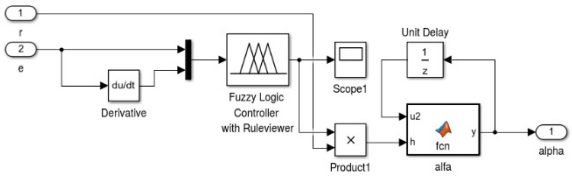


Figura 3. Bloque funcional de el algoritmo

4.1 Resultados sin la autosintonización por medio del controlador Fuzzy.

La simulación demuestra la constante sintonización del controlador PID en línea actúa rápidamente en el sistema, que de no ser corregida puede llevar a obtener un desempeño no deseado.

En la figura 4 se observa una respuesta a un escalón unitario para el sistema cuando este solo está siendo controlado por un PID sin la sintonización en linea mediante fuzzy.

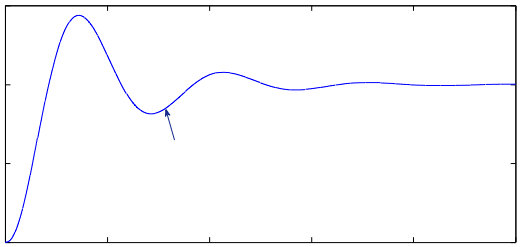


Figura 4. Respuesta escalón

En la Figura 5 se observa un comportamiento menos dinámico en el sentido de que la respuesta alcanza el estado estable con un sobrepaso menor y menos oscilaciones.

Se puede decir que el controlador Fuzzy se encarga de mejorar el rendimiento del PID convencional a medida que es modificado mediante el parámetro α quien se encarga de aumentar o disminuir proporcionalmente las ganancias proporcional, integral y derivativas.

De esta forma se obtiene una respuesta suave del sistema que si solo se utilizara el controlador PID por sí solo.

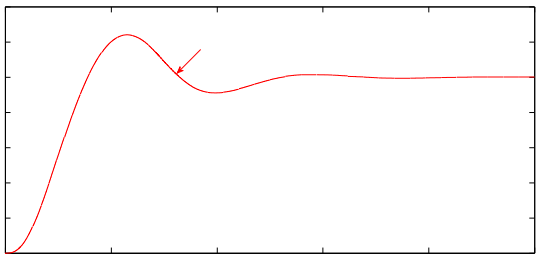


Figura 5. Sistema de 3er orden con la autosintonización del controlador Fuzzy.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

En la Figura 6 se presenta la dinámica de α(t) de la cual dependen las ganancias del controlador PID.

Se observa un cambio significativo debido a que error es significativo el tiempo suficiente como para provocar un cambio en el parámetro α(t), que modifica el controlador PID para hacerlo más rápido y después más lento, dependiendo de la dinámica del error.

Sin embargo es destacable que a pesar de que se consiguieron de manera inicial las mejores ganancias para sintonizar el controlador PID, este sufrió una variación importante, lo cual quiere decir que aunque desde un principio ya se conocía una configuración funcional del PID de la cual efectivamente como se indica en la literatura funciona adecuadamente pero a pesar de estar configurado correctamente es posible mejorara aún mas su rendimiento en cuanto a un sobrepaso reducido, mejor tiempo de establecimiento en el estado estacionario y menos oscilaciones en la respuesta transitoria.

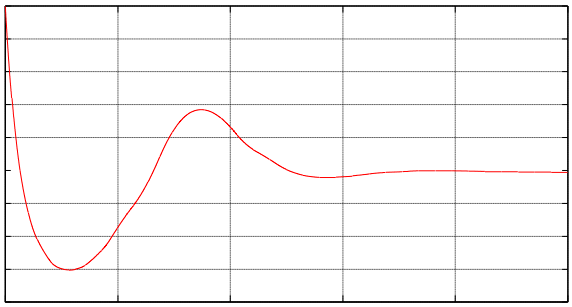


Figura 6. Comportamiento del Factor α(t).

Se presenta una comparación de ambos sistemas en la Figura 7 donde claramente se observa que se reduce el sobrepaso.

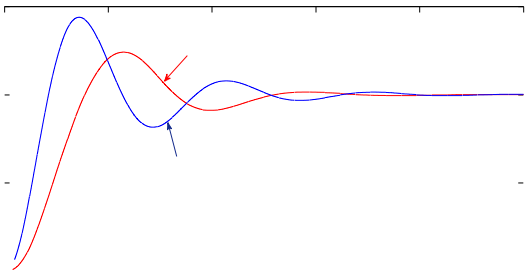


Figura 7 Respuesta a escalón unitario del sistema con controlador y controlador Fuzzy.

Se realizaron algunas pruebas adicionales para verificar que tan robusto puede ser nuestro diseño se le aplico una entrada sinusoidal al sistema, recordemos que este sistema tiene un grado relativo 3 y su dinámica es cero lo que nos permite introducir entradas variables la perturbación en este caso oscila no mayor a 0.001[mm] debido a que esa es la posición deseada de nuestro sistema en la Figura 8 se observa la respuesta de el controlador no lineal y el difuso.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Figura 8. Variables de estado que involucran la dinámica del sistema la función en verde indica el controlador difuso.

Finalmente se muestra el diagrama a bloques de todo el sistema, en una parte el control convencional y en la otra el bloque difuso implementado. (Ver Figura 9).

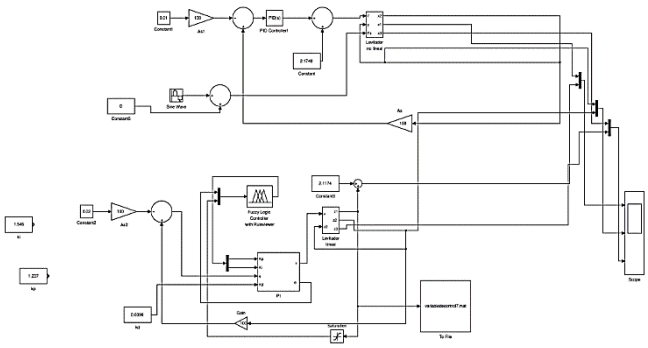


Figura 9. Diagrama de simulink para simulación del sistema difuso.

5. Conclusiones

Un controlador PID es en la mayoría de los casos la opción más plausible para realizar control sobre cualquier fenómeno, pero no todos los fenómenos son invariantes en el tiempo, es debido a esta razón que se diseñan técnicas de control para sistemas variantes en el tiempo, que aunque todos los sistemas son cambiantes, hay algunos que cambian más rápidamente que otros y es en estos casos donde estas técnicas de control son ampliamente utilizadas.

Sin duda se observaron cambios significativos en la respuesta transitoria en el sistema, lo cual indica que el controlador Fuzzy intenta mejorar la respuesta a todo momento, esto es muy deseable cuando la planta presente una perturbación no deseada que modifique en gran medida la respuesta del sistema puesto a que el controlador difuso tratara de adaptar el sistema para absorber la perturbación.

A este trabajo adicionalmente se está realizando una caracterización del sensor y realización del módulo difuso en un sistema digital FPGA para posteriormente validar lo realizando en la simulación, hasta el momento solo se cuenta con el módulo de control , embebido con una computadora, aun no se ha diseñado el control directo y se está validando el modulo del sensor el cual también de diseño en el sistema digital.

Referencias

[1] Isermann R.*"Supervision, fault-detection and fault-diagnosis methods An introduction*", ScienceDirect, Elseiver Science Ltd, volume 5, May 1997 pages 639-652.
[2] Jen-hsing L.*"Fuzzy supervisory control of a dsp-based magnetic levitation system",*Industrial Electronics (ISIE), 2013 IEEE International Symposium on, pages 1-6.
[3] Guevara M."*Diseño, modelamiento, simulación e implementación de un sistema de levitación magnética (Maglev) con un grado de libertad*",USFQ, 2011
[4] Arredondo, I. Jugo, J.*"Modelizacion,analisis y control de sistemas de cojinetes magneticos activos "*Revista iberoamericana de automatica e informatica industrial RIAI, volume 5, octubre de 2008, pages 17-27.
[5] Chagas M. "*Controle ativo de vibracao usando controladores baseados em logica fuzzy*"XV Congreso Brasileiro de Engenharia Mecanica.
[6] Rairan, J. " *Entrenamiento de una red neuronal para la medición indirecta de posición*",iis.org.
[7] Hernandez V., "*control automático*", COLECCION CIDE-TEQ, 2013
[8] Braae, M., Rutherford, D. A. *"Selection of parameters for a fuzzy logic controller*" Fuzzy Sets and Systems, Elseiver Science volume 2,pages 185-199,2003.
[9] Herbert H. *"Electromechanical Dynamics"* Departaments of elctrical and mechanical engibeering, Massachusetts Institute of Technology.
[10] Ogata K.*"Discrete-Time Control Systems (2nd Edition) "*Prentice-Hall,pag 317-373.

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

39. Diseño y Construcción de una Mano Robótica para el Proceso de Enseñanza – Aprendizaje de la Mecatrónica

Cruz Ramírez S. Rolando[1], Tapia Rodríguez Fidencio[2]

rolando.cruz@itesm.mx, fidencio.tapia@reach.mx

(1) Escuela de Ingeniería y Ciencias, Tecnológico de Monterrey Campus San Luis
(2) Reach Innovation S. A. de C. V.

Resumen

El presente trabajo contiene el diseño y la construcción de una mano robótica como un enfoque práctico para la enseñanza-aprendizaje de la mecatrónica. Los tópicos involucrados en este proyecto, como diseño, tecnología de fabricación, microcontroladores y control digital son parte de los temas principales a tener en cuenta y a ser evaluados. En los resultados preliminares, la mano robótica puede sostener objetos ligeros, mover cada dedo individualmente, detectar la temperatura en la parte de la palma y reproducir los movimientos humanos básicos. Fue trascendental que los estudiantes ganaran conocimiento mediante la aplicación de conceptos teóricos en un proyecto real y desafiante.

Palabras clave: Enseñanza-Aprendizaje de la Mecatrónica, Aprendizaje Basado en Proyectos, Mano Robótica.

1. Introducción

Los estudiantes de ingeniería realmente disfrutan trabajando en proyectos y su aprendizaje se vuelve más significativo y duradero cuando está comprometido con su propio trabajo; por esta razón, el aprendizaje basado en proyectos siempre ha sido de gran interés para la enseñanza de la ingeniería [1].

Una mano robótica se decidió como el proyecto a ser desarrollado ya que para su construcción, distintas materias de la Mecatrónica se requieren; por ejemplo diseño de máquinas, control automático, entre otros. Por otra parte, la construcción de la mano robótica se volvió más significativa para los estudiantes desde el principio del semestre.

En este trabajo, el objetivo a ser discutido es el impacto positivo en la enseñanza-aprendizaje de la Mecatrónica cuando los estudiantes participan en un proyecto desafiante, en este caso: el desarrollo y la construcción de una mano robótica. Técnicamente, la mano robótica tiene que tener una forma similar, el tamaño y movimientos como los de una mano humana. Además, tiene que ser capaz de responder a estímulos ambientales y los comandos del usuario. Así, en la sección 2 se describe el desarrollo de la mano robótica. En la sección 3 se presentan los resultados de impacto del método de enseñanza. La conclusión y trabajo futuro se resumen en la sección 4.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

2. Desarrollo de la Mano Robótica

Esta sección incluye el diseño, desarrollo y construcción de la mano robótica. Entre otras cuestiones, implica la selección de los materiales de la mano; la identificación del sistema con el fin de obtener un movimiento controlado; y la programación tanto de la interfaz humano-máquina (HMI) como la de los microcontroladores.

La figura 1 muestra el diagrama general del sistema propuesto. Una computadora personal incluye la HMI desarrollada en LabVIEW la cual tiene comunicación con un microcontrolador maestro basado en la plataforma Arduino. El dispositivo anterior tiene comunicación con cinco microcontroladores esclavos donde cada uno tiene un control de lazo cerrado para cada uno de los dedos.

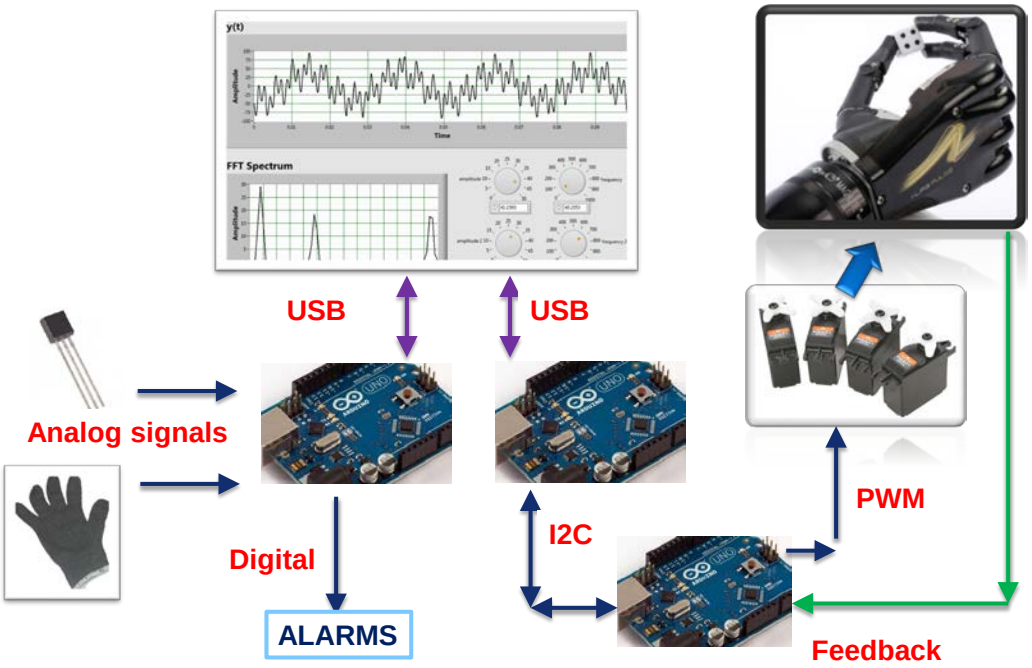


Figura 1. Diagrama general del sistema.

Un segundo microcontrolador maestro recibe la información de un sensor de temperatura y aquellos que se incluyen en un guante el cual puede ser utilizado también como un dispositivo de entrada.

En general, el diseño y desarrollo de la mano robótica se basó en la metodología presentada por Ulrich y Eppinger [2]. Primero se definen las necesidades, de allí se pasó a las especificaciones hasta llegar a la generación de conceptos.

2.1 Análisis y Diseño de los Mecanismos

Cada dedo está formado por tres barras pequeñas y tres enlaces que simulan las falanges, todos los componentes tienen juntas con un eje de movimiento como se muestra en la figura 2 (a). Tomando estos componentes, el siguiente sistema se puede construir: una base fija (tierra) que es la unión del primer enlace con la palma de la mano, dos enlaces con un grado de libertad cada uno, un hilo que es la unión del servomotor (actuador) con cada eslabón, esta junta permite que el actuador proporcione el movimiento como un sistema impulsado por tendones.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Para la fabricación de la mano robótica, fue elegido el proceso de impresión 3D. Este proceso usa plásticos de Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS) y la máquina de impresión 3D posiciona capas delgadas hasta que se complete la forma final. Una vez teniendo el diseño en Solidworks, la información requerida se envía a la computadora que controla la impresora 3D. Para comenzar a trabajar, la máquina necesita algunos requisitos tales como: rellenado de los polímeros y sujetadores de las piezas. La máquina comienza el proceso de construcción, que es semi-automático. Cada capa es aproximadamente de 0.1 mm de espesor. Este proceso podría tomar horas o incluso días. En este caso, tomó una semana para ser terminada. En la figura 2 (b) se puede apreciar uno de los dedos y en la figura 3 toda la mano impresa en 3D.

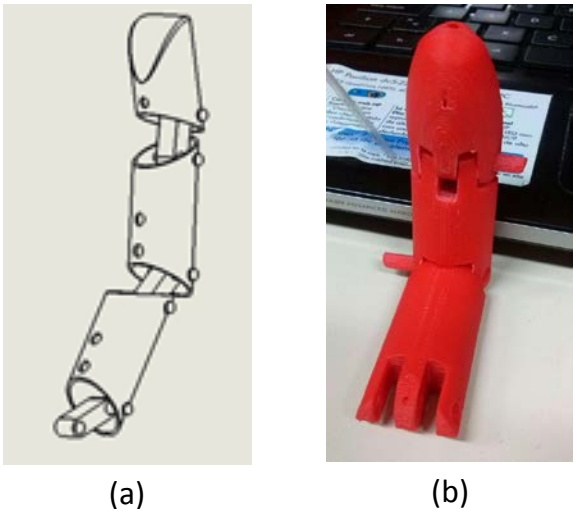


Figura 2. (a) Esquema de uno de los dedos. (b) Dedo robótico construido en una impresora 3D.

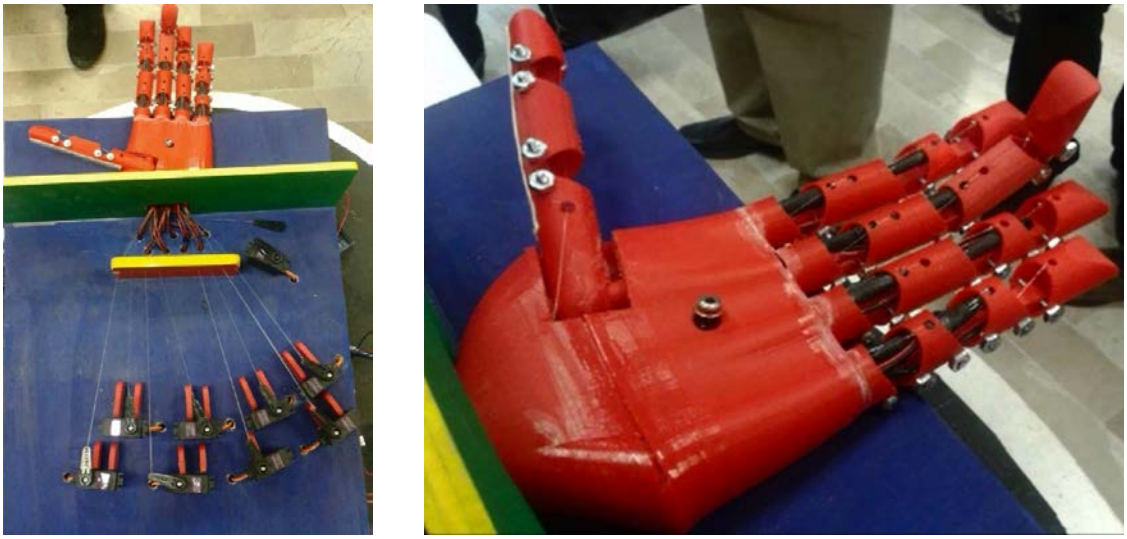


Figura 3. Mano robótica completa.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

2.2. Microcontroladores

Se utilizaron microcontroladores porque era necesario tener sincronización al enviar y recibir comandos desde la computadora; el hacer cálculos; y el tomar decisiones programadas con el fin de realizar los movimientos deseados. Además de que el temario de enseñanza – aprendizaje así lo solicitaba.

En este proyecto, siete microcontroladores Arduino MEGA fueron utilizados, el primero recibe cinco señales analógicas que corresponden a los sensores colocados dentro de un guante y una señal extra proveniente del sensor de temperatura MLX90614. El segundo es el microcontrolador maestro que es responsable de enviar y recibir datos desde una PC Brix Gigabyte Ga BXT 1900 que incluye la HMI basada en LabVIEW, la figura 4 muestra estos dos elementos. LabVIEW envía información al dedo que se desea mover, y cuanto movimiento es requerido. La comunicación entre LabVIEW y estos dos microcontroladores está basada en I^2C.

Figura 4. (a) PC portátil utilizada en el proyecto. (b) Apariencia de la HMI.

Los otros cinco microcontroladores funcionan como esclavos, cada uno tiene un control de lazo cerrado para uno de los dedos donde el movimiento de los servomotores se logra mediante el uso de Modulación por Ancho de Pulso (PWM).

2.3. Control Digital de Lazo Cerrado

Una planta en un sistema recibe una señal deseada (referencia), luego es procesada y una salida es generada. En un sistema de control de lazo cerrado, la salida se retroalimenta para ser comparada con la referencia y obtener una corrección de manera automática. En la mano robótica, cada microcontrolador esclavo es responsable de llevar este proceso de control en cada uno de los dedos. Un dedo incluye dos servomotores para su movimiento y los dos actuadores son controlados por un microcontrolador. La planta del sistema para cada uno de los dedos, se considera desde los servomotores hasta la falange final.

La retroalimentación de cada dedo son sensores flexibles de construcción tipo casera los cuales se componen de un emisor de luz y un receptor de luz. Un emisor se anexa al eslabón (i) y su receptor al eslabón $(i+1)$ con el fin de medir de manera indirecta el ángulo en base a la intensidad de luz recibida. Una vez que los sensores fueron colocados en los dedos de la mano, se realizaron las siguientes tareas: identificación del sistema; afinación de control del PID; y evaluación del desempeño.

Para la identificación del sistema, una función escalón fue introducida comenzando desde el valor más bajo en posición angular y terminando en el máximo. Luego se registraron continuamente los datos

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

del sensor. Este procedimiento se completó tres veces para cada sensor con el fin de obtener un comportamiento promedio del sistema. Un ejemplo de la curva de comportamiento se grafica en la figura 5.

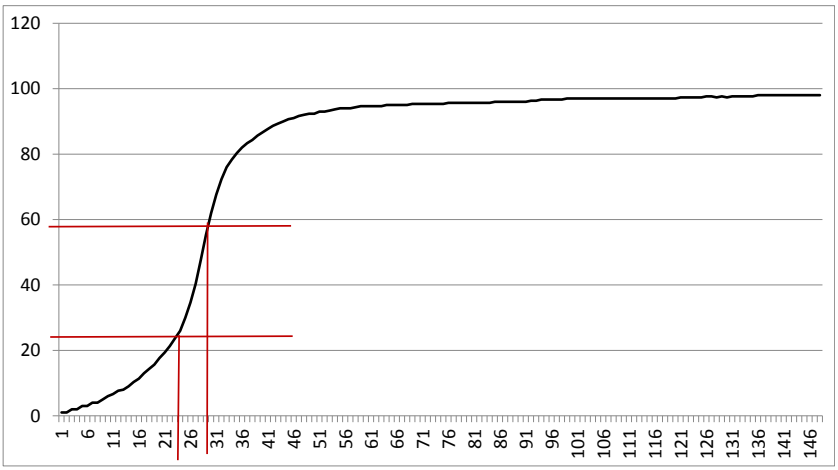


Figura 5. Respuesta al escalón de uno de los dedos.

Como se ve en la figura 5, la respuesta al escalón corresponde a un sistema de primer orden. Mediante el método gráfico de Cecil Smith [3], la función de transferencia es obtenida y está representada en la ecuación (1).

$$G(s) = \frac{2.4e^{-0.0036s}}{0.0012s+1} \tag{1}$$

Una vez teniendo la curva característica de cada sistema, se utilizó el método de criterios integrales para ajustar el controlador PID para cada planta. Los valores conseguidos, teniendo en cuenta el sistema descrito en la ecuación (1), son $K_c = 0.158, K_i = 46.393 y K_d = 0.001$, considerando la estructura ideal de un controlador PID [3] como se muestra en la ecuación (2),

$$U(s) = \left(K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s\right) E(s) \tag{2}$$

Por último, para programar los controladores digitales en el hardware, es necesario discretizar los resultados. Por lo tanto, la aproximación bilineal para pasar del dominio s al z fue necesaria. Finalmente la transformada Z inversa se aplica para obtener la ecuación en diferencias asociada, la cual ya puede ser escrita en el código de los microcontroladores. La ecuación (3) incluye la ecuación en diferencias obtenida donde los coeficientes quedan en función de las constantes $K_c, K_i y K_d$. El PID discreto queda en función del error medido al igual que estados anteriores tanto del error como la señal de control.

$$u[k] = a_0 e[k] + a_1 e[k-1] + a_2 e[k-2] + b_0 u[k-2] \tag{3}$$

3. Análisis de la Enseñanza-Aprendizaje

En la primera parte del semestre, se estudió la teoría de los cursos involucrados en el proyecto y hubo evaluaciones en forma tradicional. Durante la segunda parte del semestre, la evaluación se basó en el progreso del proyecto, una presentación final, la evaluación de todos los profesores involucrados y evaluaciones entre pares.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Con respecto a la opinión general de los estudiantes a los profesores, ésta varió de 1.27 a 1.6, siendo 1 una calificación perfecta y 5 la peor. En el punto de innovación educativa la calificación varió de 1.13 a 1.6, las cuales son consideradas como unas buenas evaluaciones.

Se presentan algunos de los comentarios de los estudiantes que tomaron parte en el proyecto:

> El desarrollo de este proyecto fue un gran reto ya que no sólo tuvimos que aprender sobre los cursos del semestre, sino además tuvimos que aplicar los conocimientos adquiridos durante nuestra carrera. En mi opinión, durante el desarrollo del proyecto, además de aplicar las cosas que ya sabíamos, aprendimos muchas cosas que no necesariamente se podrían haber impartido en el aula.
>
> Fue una experiencia divertida no sólo en la parte de ingeniería, sino en el trabajo en equipo y en las cosas administrativas, como el proceso de cómo hacer una compra; eso nunca lo hubiera visto en clase.
>
> Personalmente vi este proyecto como una excelente forma de culminar mis estudios, ya que reunió las partes más importantes de mi carrera.
>
> Este tipo de proyectos es un extra para nuestros estudios porque tuvimos la oportunidad de aplicar de forma real toda la teoría aprendida en las clases. La mayor parte de mi trabajo estaba en el área de control simulando el sistema y también construyendo algunos sensores. Fue una buena experiencia el ver cómo crear algo de la nada, hemos diseñado, construido e integrado un sistema completo.
>
> Creo que nos faltó cubrir temas importantes del curso (teoría) dando preferencia al proyecto.

Finalmente, en nuestra escuela de Ingeniería siempre cerramos el semestre con una exposición de proyectos de las carreras y hay una votación interna por el mejor proyecto del semestre. El proyecto de la mano robótica ganó la votación pública al proyecto más completo en la Expo de Proyectos de Ingeniería Agosto - Diciembre 2014. La figura 6 muestra la exposición de estos proyectos durante la Expo.

Figura 6. Grupos de alumnos participantes en el proyecto Semestre Integrador para IMT.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

4. Conclusiones

El diseño y fabricación de una mano robótica funcional que puede detectar cambios en su entorno como la temperatura y que cada dedo pueda realizar movimientos individuales, fueron logrados.

Algunas dificultades que se presentaron fueron las programaciones de las fechas durante la fabricación. Como trabajo a futuro, el control de los dedos puede mejorarse utilizando mejores sensores. Otra forma de mejorar el proyecto sería encontrar componentes más pequeños, lo que permitiría un diseño más práctico y con mejor apariencia.

Además del producto físico terminado, los estudiantes ganaron conocimiento mediante la aplicación de conceptos teóricos en un proyecto que trasciende a lo que podrían haber aprendido en el aula.

La mayoría de los estudiantes estuvieron muy contentos al desarrollar un proyecto real en el área de la Mecatrónica además de que representó un desafío para ellos. El proyecto tiene un valioso aprendizaje tanto para los estudiantes como los profesores involucrados. Estamos convencidos de implementar nuevamente este tipo de iniciativa educativa.

Referencias

[1] Rodríguez E., Luna J, Vargas S. y Édgar M. *"Evaluación de la estrategia Aprendizaje Basado en Proyectos"*, *Educación y Educadores*. 13, 1, pp 13-25, (2010).

[2] Ulrich K. T. & Eppinger, S. D. *"Product Design and Development",* 4th Ed., ISBN: 978-970-10-6936-3.

[3] Ogata K. *"Discrete-time control systems",* 2nd. ed., Prentice Hall.

Reconocimientos

Los profesores del equipo agradecemos efusivamente a la iniciativa NOVUS 2014 del Tec de Monterrey por financiar este proyecto, agradecemos también la visita y apoyo de la Ford Motor Company S.A. de C. V., particularmente a los Ing. Beltsasar Rosas Hernandez y David Delgado Andrade (EXATEC IMT 2013). Agradecemos el apoyo y la colaboración de Carlos Poceros, Hugo Borjas y Felipe Banda.

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

40. Instalación y control de sistema háptico Novint Falcon con Matlab

Miguel Durán Fonseca, Jorge Gudiño Lau, Mauricio López Ramos, Saida Charre Ibarra y Janeth Alcalá Rodríguez

jglau@ucol.mx

Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Electromecánica.

Resumen

En este trabajo se presenta la implementación de una interfaz háptica empleando el dispositivo háptico Novint Falcon y una herramienta computacional. El Novint Falcon es un dispositivo háptico de 3 grados de libertad con una interface USB para su interconexión con la computadora. El software utilizado para la comunicación entre la computadora y el dispositivo háptico es el Simulink® de Matlab® con la librería "v-realm builder", la cual registra los movimientos del Novint para reproducirlos en el ambiente virtual.

Para el control se diseñó un algoritmo computacional que calcula un vector de fuerza que se transmite al usuario a través del dispositivo háptico, con esto logra al estimular el sentido del tacto del usuario y además se diseñó un renderizado háptico para estimular la vista. El ambiente virtual diseñado representa el movimiento de la luna y el planeta tierra.

Palabras clave: Control de sistemas hápticos, interfaz háptica, entorno virtual, Novint Falcon y realidad virtual.

1. Introducción

La háptica se refiere al conjunto de interfaces tecnológicas que interaccionan con el ser humano mediante el sentido del tacto. Se trata de una tecnología emergente desde los años 90 que está evolucionando prometedoramente en algunos campos de aplicación. Un sistema háptico presenta un canal bidireccional de comunicación entre el entorno virtual y el cerebro [1], permitiendo de esta forma no solo transmitir un visual y/o auditivo.

Una de las formas más tempranas de uso de las tecnologías hápticas en dispositivos se introdujo en los servosistemas de los grandes aviones, con la intención de operarlos. Estos sistemas primitivos actuaban en una única vía de tal forma que la fuerza aplicada a un mando se multiplicaba hacia las superficies de control aerodinámico, pero el piloto no obtenía como respuesta un factor de la fuerza resistente.

Existen diversas interfaces hápticas de aplicación a la medicina y que pueden resultar útiles a la hora de intentar minimizar los daños ocasionados por el uso de procedimientos invasivos y permitir operar de forma remota. En el futuro, es posible que los médicos expertos puedan hacer operaciones remotas. Además se han utilizado dispositivos hápticos en rehabilitación asistida por robots. [2]

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

2. Háptica

La etimología de la háptica proviene del griego *haptikos* que significa tocar, agarra, y se refiere a la existencia de una característica táctil. La retroalimentación de fuerza de contacto o kinestesia, es un campo de investigación de la háptica que trata con dispositivos que interactúan con músculos y tendones, y proporcionan al operador humano la sensación de que se aplica una fuerza en un mundo virtual. La kinestesia, trata de una percepción activa, a la inversa de la percepción cutánea que es pasiva. En el caso de la percepción cutánea, la estimulación de la piel es provocada por un movimiento de la mano en contacto con uno o más objetos.

La memoria háptica almacena las informaciones sensoriales específicas del tacto. Las sensaciones táctiles, kinestésicas y térmicas se trabajan hoy en día en ingeniería para desarrollar videojuegos [3].

En la Figura 1 se muestra una representación de una interfaz háptica ideal, donde el usuario puede interactuar con un ambiente virtual y recibir una retroalimentación kinestésica (fuerza), por medio de la tecnología se pretende emular la háptica del tacto mostrada en la Figura 2. En la práctica se utiliza un dispositivo háptico para interactuar con una interfaz háptica, en la siguiente sección se presentan dichos dispositivos.

Figura 1. Interfaz háptica ideal

Figura 2. Háptica en el tacto

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

3. Dispositivos hápticos

Un dispositivo háptico permite a un usuario tocar, sentir, manipular y cambiar objetos tridimensionales dentro de un ambiente virtual. Un dispositivo háptico añade el sentido del tacto a la experiencia virtual y buscan aplicar el sentido del tacto a la interacción humana con sistemas informáticos. Los dispositivos hápticos se conectan a una computadora por medio de un puerto (generalmente el puerto USB), envía un vector posición cartesiana (x, y, z) a la computadora y el dispositivo recibe un vector de fuerza (f_x, f_y y f_z) que es enviado por la computadora, también se debe contar con un algoritmo de control háptico para permitir al usuario esa sensación de estar tocando un objeto real [4].

En la Figura 3 se muestra el dispositivo háptico Novint Falcon se desarrolló para videojuegos por la empresa Novint Technologies Inc.

Figura 3: Novint Falcon® usado en videojuegos

Otro dispositivo háptico es el Omni phantom, mostrado en la Figura 4, el cual cuenta con seis grados de libertad. Este cuenta con un efector final en forma de pluma lo que permite una manipulación más natural [5].

Figura 4: Phantom omni®

Los dispositivos hápticos proporcionan retroalimentación de fuerza (producción mecánica de información sensorial por el sistema kinésico, es decir por la sensación del movimiento, sensaciones

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

originadas en el músculo, tendones y uniones) al sujeto que interactúa con entornos virtuales o remotos. Tales dispositivos trasladan una sensación de presencia al operador. El usuario no sólo envía la información a la computadora, sino que también puede recibir la información desde la computadora en forma de una sensación sobre alguna parte del cuerpo [6].

4. Novint Falcon

El dispositivo háptico empleado en este trabajo es el Novint Falcon (Figura 5), el cual cuenta con 3 grados de libertad accionados por un mecanismo con 3 actuadores rotacionales montados a la base y una serie de paralelogramos cinemáticos con una configuración similar a un robot delta con un espacio de trabajo tridimensional de 10cmx10cmx10cm el cual es suficiente para navegar en un ambiente virtual. Este dispositivo ha probado ser una excelente plataforma para diversas operaciones y tareas debido a la baja inercia del mecanismo, alta velocidad y rigidez, además de una buena potencia en su desempeño. Sin embargo, esto conlleva a que el control de este sistema háptico, así como su modelo matemático (dinámico y cinemático) sean bastante complejos [7].

Figura 5: Sistema háptico Novint Falcon

El efector final del Novint Falcon corresponde a un mango que el usuario puede sujetar con su mano, de tal manera que el usuario pueda interactuar con el objeto virtual, carácter o ambiente, y lograr manipularlo en cada momento que entre en contacto con el objeto, de esta manera, los motores del dispositivo se encienden, lo que le permite sentir textura, forma, peso, las dimensiones y la dinámica total y parcial de los objetos virtuales [8].

El dispositivo háptico Novint Falcon utiliza una interfaz USB con un tiempo típico de muestreo de datos de 1 milisegundo. Sin embargo, debido al tiempo de retardo en los datos, ese tiempo oscila entre 1 y 1.25 milisegundos, dependiendo del procesamiento de la computadora. [9]

5. Software del Novint Falcon

Para poder desarrollar el control del dispositivo háptico Novint Falcon, se utilizó el software Matlab versión 2013 64 bits (Figura 6), los drivers y librerías del Novint Falcon, además de la herramienta computacional para desarrollar interfaces hápticas “v-realm builder” (Figura 7). El software v-realm builder se emplea para diseñar los entornos virtuales para el dispositivo háptico Novint Falcon.

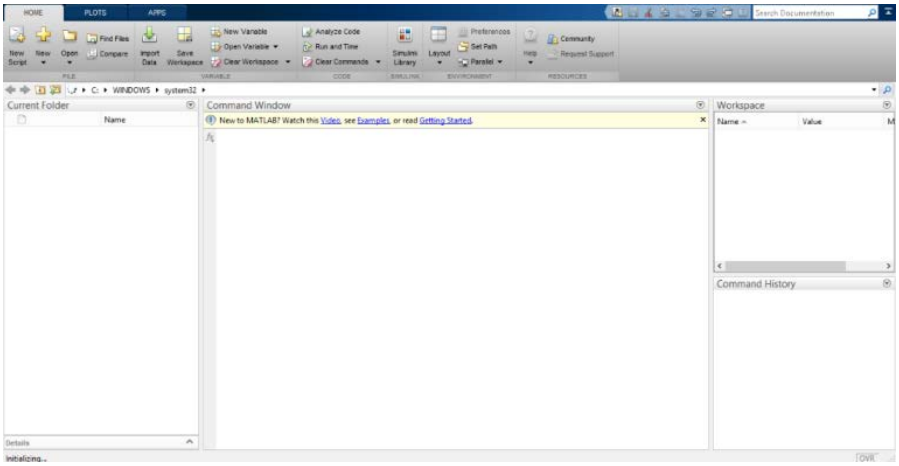


Figura 6: Ventana principal de Matlab

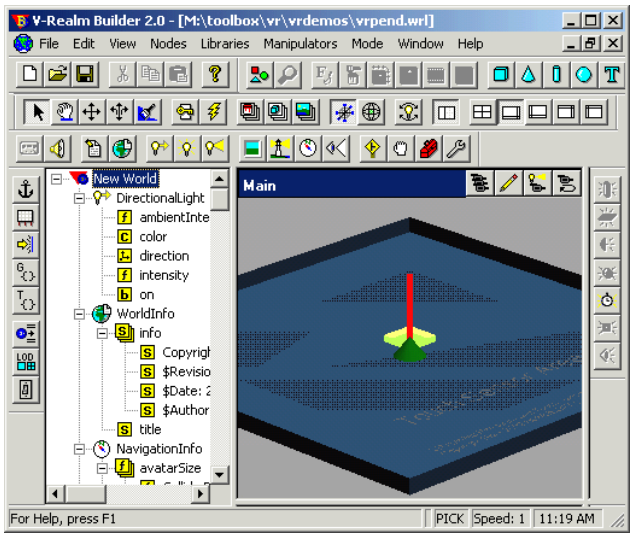


Figura 7: Interfaz de v-realm builder

Para poder trabajar con el dispositivo háptico Novint Falcon se requiere la instalación de los drivers concernientes al dispositivo, además del siguiente software:

- ✓ OpenHaptics
- ✓ Sensable
- ✓ Haptik.library

Este último software se puede obtener de [10], ver Figura 8.

OpenHaptics y Sensable son programas para que la computadora detecte el dispositivo háptico que se le conecte. Haptik.library es la librería necesaria para que Matlab pueda detectar el sistema háptico. Una vez instalados, se procedió a la configuración.

haptik.library genera un archivo llamado haptik.config, este se editó reemplazando la línea:

HaptikLibrary.plugin4_0 = Haptik.Spectre.dll

por

HaptikLibrary.plugin4_0 = Haptik.Falcon.dll

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Figura 8: Página oficial de Haptik library

Como se muestra en la Figura 9, el archivo haptik.config debe quedar de la siguiente manera:

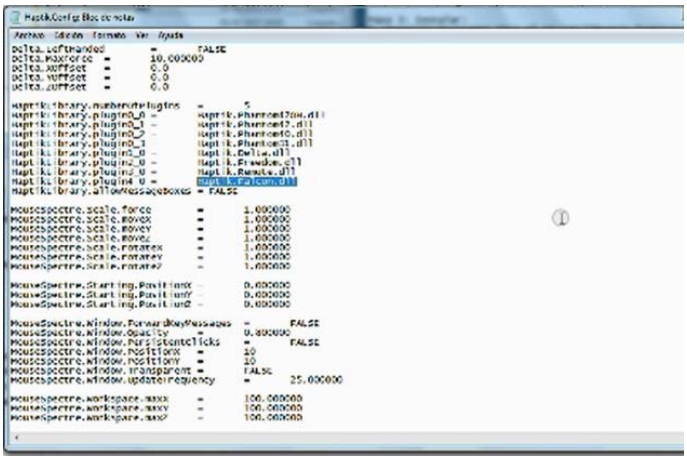


Figura 9: Archivo Haptik.config

Se requiere guardar este archivo en la carpeta donde se tiene instalado Matlab (Figura 10) y a la carpeta de simulink.

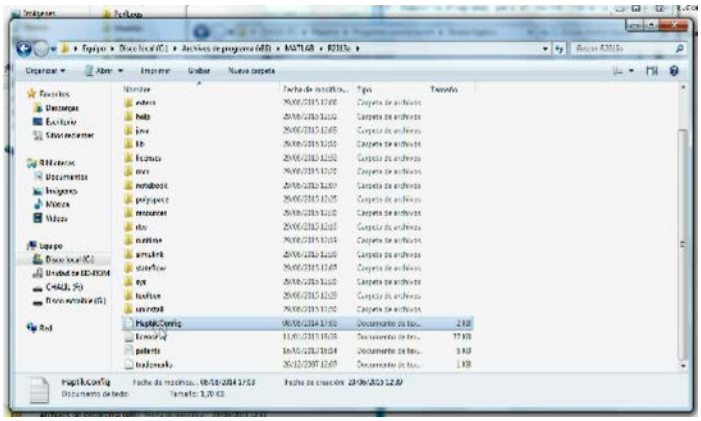


Figura 10: carpeta de matlab donde se debe copiar el archivo

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

6. Control del dispositivo y ambiente virtual

Para el control del Novint Falcon, se emplea el modelo del sistema a bloques en simulink. En la figura 11 se muestra el primer diagrama a bloques que se utilizó, el cual se obtuvo de la librería de haptik.library [10].

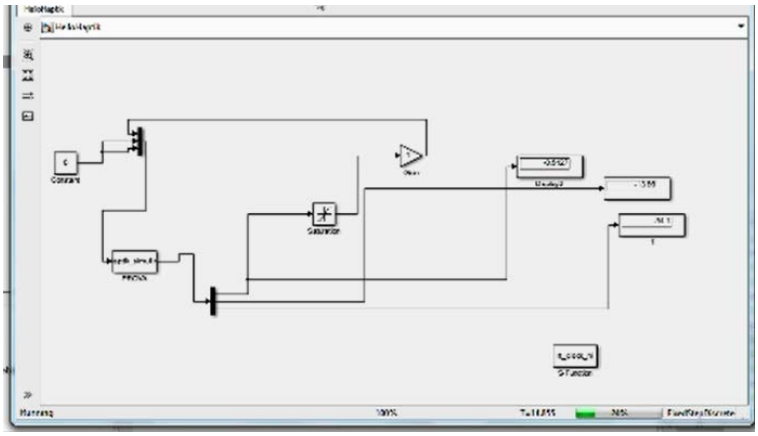


Figura 11: sistema de bloques en simulink para leer posición x,y,z

A partir de este modelo de simulink, se construyó el modelo de bloques que se muestra en la Figura 12. Este el modelo en simulink consta de un bloque de variables de entrada que llegan a un bloque de Matlab Function y tienen a la salida un bloque de modelo 3D, el cual abrirá la interfaz del ambiente virtual donde se probará el dispositivo.

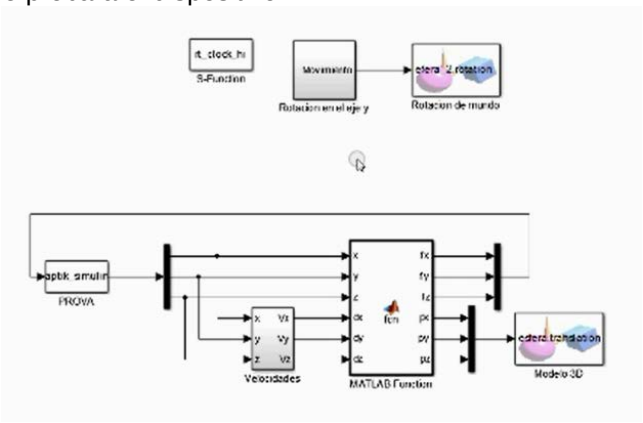


Figura 12: Modelo usado para la interfaz háptica

El bloque de Matlab Function tiene un código (Figura 13), en el cual programa la dinámica del ambiente virtual, es decir, define el comportamiento de los objetos virtuales y calcula la fuerza enviada al usuario a través del dispositivo háptico.

Para calcular la fuerza enviada al dispositivo háptico al momento de detectar una colisión, se utiliza la ley de Hook para un resorte lineal [11]:

$$F = Kx \tag{1}$$

donde K es el coeficiente del resorte, x es la profundidad de penetración y F es la fuerza de reacción.

Además se consideró la viscosidad del objeto calculando una fuerza adicional dada por:

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

$$F = Bv \quad (2)$$

donde B es el coeficiente del viscosida, v es la velocidad de movimiento del dispositivo háptico y F es la fuerza de reacción.

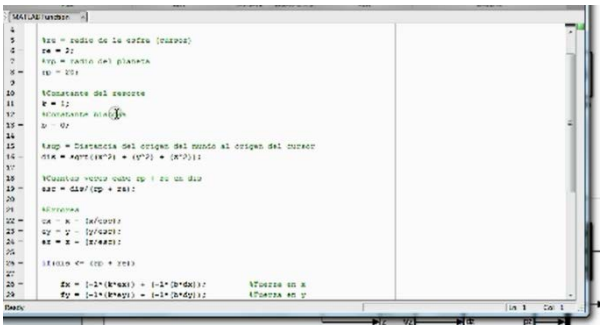


Figura 13: Programación del bloque Matlab function

Por tanto, la fuerza enviada al dispositivo háptico durante una colisión es la suma de las fuerzas dadas por las ecuaciones (1) y (2).

Ya que se tiene el modelo dinámico para las aplicaciones hápticas, se puede usar para ambientes virtuales existentes o en su defecto crear nuevos. En este caso, se creó un ambiente virtual para hacer pruebas con el dispositivo. Para ello se usa el bloque VR sink (Figura 14) y se le da clic en new, para abrir un nuevo archivo (Figura 15)

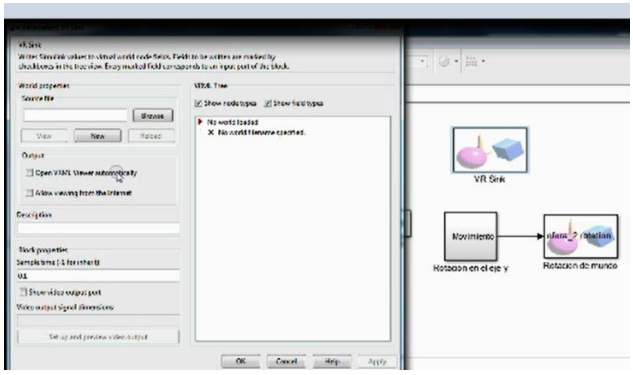


Figura 14: Bloque de propiedades de VR Sink

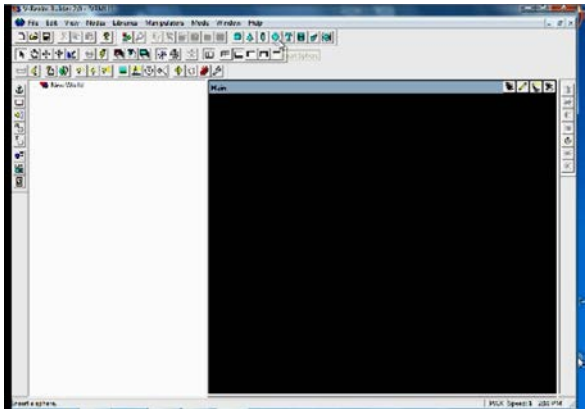


Figura 15: Interfaz de V-realm builder para crear ambientes virtuales

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

En la figura 16 se muestra el ambiente virtual creado contiene dos objetos representando al planeta tierra y a su satélite natural, la luna. Para esto, sólo se requirió dibujar 2 esferas: una grande y una pequeña. La grande representará al planeta tierra y la pequeña representará la luna. Se le añaden texturas con fin de que se identifique cada elemento.

Figura 16: Ambiente virtual para el dispositivo Novint Falcon

7. Resultados

Ya que se realizó el ambiente virtual y el algoritmo para calcular la fuerza de retroalimentación del sistema háptico, se procedieron a realizar pruebas. El Novint se usó para mover a la luna y ver su comportamiento al tocar al planeta tierra. Las pruebas experimentales realizadas se muestran en las Figuras 17, 18, 19 y 20.

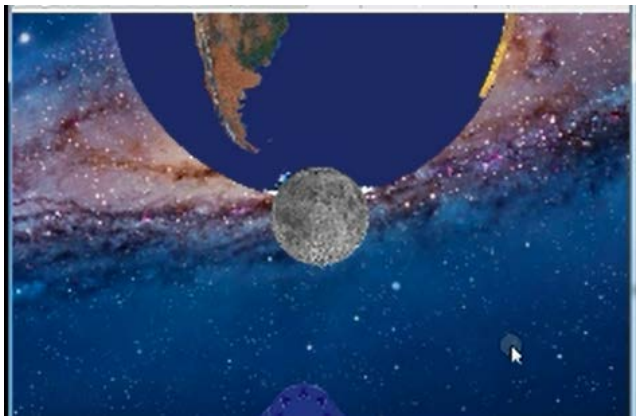


Figura 17: Prueba de la luna tocando a la tierra desde la perspectiva de la Luna

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Figura 18: Prueba de la luna tocando a la tierra desde la perspectiva de la Tierra

Figura 19: Prueba de la interfaz usando la vista trasera de la luna

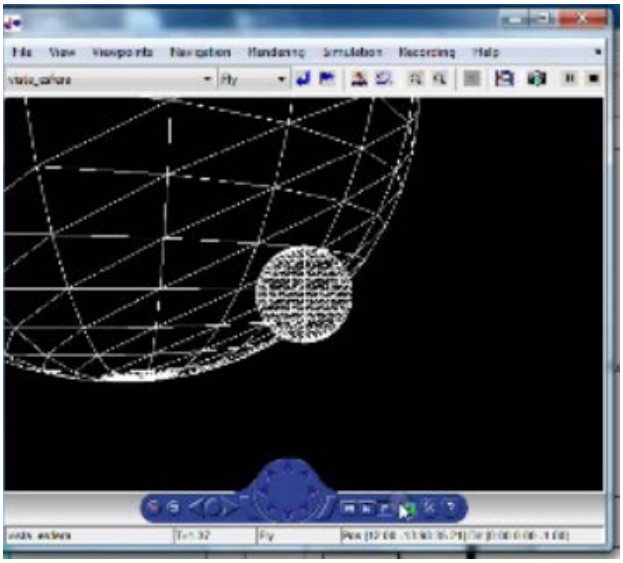


Figura 20: Interfaz háptica en entorno geométrico

En los 3 primeros casos (Figuras 17, 18 y 19), la luna, al tocar (colisión) al planeta tierra, ejercía una fuerza de repulsión calculada mediante las ecuaciones (1) y (2) hacen sentir al usuario la colisión

entre los planetas. En cambio, cuando se encuentra en el entorno geométrico (Figura 20), al tocar al planeta tierra, no se envía fuerza al dispositivo háptico por ello, era capaz de atravesarla sin ningún problema.

8. Conclusiones

El sistema háptico Novint Falcon es un dispositivo de gran potencial, ya que tiene muchas aplicaciones en diversas áreas, sea medicina, teleoperacion, videojuegos, en el sector industrial, entre otras, por ello vale la pena profundizar en este dispositivo.

Cabe destacar que algunas de las características más atractivas del Novint Falcon son su disponibilidad y su uso, que es bastante práctico y cómodo al momento de emplearlo en múltiples plataformas que implique el uso de dispositivos robóticos.

Bibliografía

[1] What is Haptics?. http://touchlab.mit.edu. Consultada en agosto 2015.
[2] “Tecnología Háptica” http://www.ecured.cu/index.php/Tecnolog%C3%ADa_h%C3%A1ptica
[3] “Háptica - definición” http://salud.ccm.net/faq/13878-haptica-definicion
[4] J. L. Rodríguez, R. Velázquez. “Haptic Rendering of Virtual Shapes with the Novint Falcon”. Procedia Technology. 3. 132-138.

[5] Kawai, Satoru, Faust Jr., Paul H. y MacKenzie, Christine L. (2012). “Computer Graphic and PHANToM Haptic Displays: Powerful Tools in Understand How Human Perceive Heaviness”. En: El Saddik, Abdulmotaleb (ed.), Haptics Rendering and Applications (pp. 25-46). Rijeka, Croatia: InTech.

[6] Martin S, Hillier N. “Characterisation of the Novint Falcon Haptic Device for Application as a Robot Manipulator”, Australian Conference on Robotics and Automation, CSIRO ICT Centre, 9, Sydney, Australia, 2009

[7] Domínguez R. Parra V. “Diseño e integración de una interfaz háptica activa realista” CINVESTAV, 12, México, 2004
[8] Novint. Página web http://home.novint.com/products/novintfalcon.php. Consultada en agosto de 2015.
[9] Maallem, Dispositivos hápticos y de realimentación de fuerza. http://www.fiwiki.org/images/f/f5/Dispositivos_Hapticos_y_de_realimentacion_de_fuerza.pdf Consultada en julio 2015.
[10] Haptik library. Página web http://sirslab.dii.unisi.it/haptiklibrary/download.htm. Consultada en agosto de 2015.
[11] F. Rydén. H. Chizeck, Howard. “A Proxy Method for Real-Time 3-DOF Haptic Rendering of streaming Point Cloud Data”. “IEEE Transactions on Haptics”. 6. 3. 2013. 257-267.

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

41. Separador de Botellas de Vidrio por color Utilizando un Microcontrolador PIC18F26K22

Lugo Marcos, Díaz Ever, Gómez Leonel, Ozuna Gustavo

gozuna@industrial.uson.mx

Universidad de Sonora, México

Resumen

La importancia y necesidad de reciclar para reducir la contaminación al medio ambiente; nos ha obligado a idear soluciones para nuevos retos en la industria. Este proyecto se propuso para una empresa recicladora de botellas de vidrio, la cual las tritura para formar texturas con vidrio incrustado para la construcción. En el siguiente artículo se muestra los pasos que se siguieron para diseñar y elaborar un separador de botellas para dicha empresa.

1. Introducción

Debido que las botellas vienen de forma mixta en cuanto al color, surgió la necesidad de diseñar un separador de botellas según su color. El cual consistirá en un conducto que hará caer la botella que por gravedad, a un soporte donde solo podrá tomar una botella a la vez, acto seguido detectara si realmente tomo la botella, después identificara el color y se dirigirá al contenedor adecuado según el color.

2. Problema

Una planta procesadora de botellas de vidrio tiene el problema que al momento de comprar las botellas, estas vienen mezcladas en cuanto a su color, para ellos es importante separar las botellas verdes, azules, cafés, y las que no entren en estos grupos ocupan el grupo de las botellas mixtas. Por lo que se propuso un sistema para separarlas por su color.

3. Prototipo

El prototipo que consta de un canalón por el cual pasaran las botellas por el efecto de la gravedad de manera acostada, estás caerán de una en una a la base con la forma de la botella, esta base gira sobre un eje horizontal y contiene dos sensores, un sensor para monitorear presencia de un objeto y el otro para determinar el color del objeto que tenga presente, cuando determina el color un segundo canalón móvil, gira sobre un eje vertical que direcciona la botella al contenedor correspondiente, este cuanta con un sensor que detecta la botella, esto para comenzar de nuevo el ciclo. El prototipo se muestra en la Figura 1.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

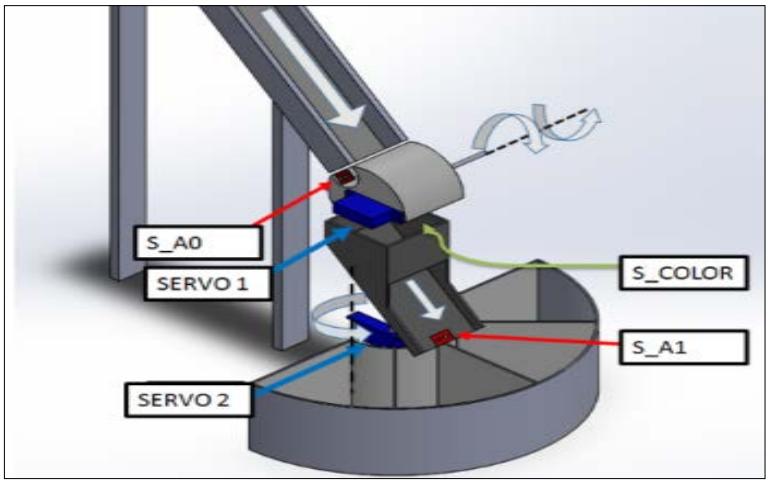


Figura. 1. Prototipo descrito.

El prototipo cuenta con dos servo motores DC marca SAVÖX modelo SA-1230SG con un torque de 30-36 Kg/in @6volts, también cuenta con dos sensores IR que proporcionan un valor analógico el cual se monitorea con una resolución de 10 bits para determinar si existe un objeto o no, y un tercer sensor modelo TCS230 de la empresa TAOS que arroja una determinada frecuencia según el color del objeto, esto lo logra emitiendo una luz blanca al momento incidir en el objeto regresa con una determinada frecuencia. Para el control se propuso utilizar un microcontrolador PIC18F26k22 por su bajo costo y sus características **[**1], todo el proceso se inicia con un pulsador normalmente abierto que al momento de presionarlo inicia el proceso. El controlador, sensores y actuadores se muestran en la Figura 2.

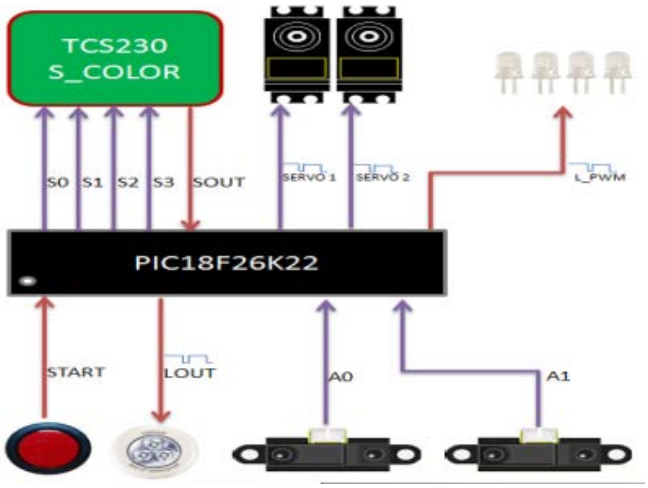


Figura 2. Componentes

4. Control

Para el control se decidió utilizar un microcontrolador PIC18F26K22 porque debido a que debíamos capturar frecuencia este funciona hasta una velocidad de 64MHz con un oscilador externo, además de contar con canales analógicos, puertos de entradas y salidas, hasta 5 PWM y timers de

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

hasta 16 bits. Se tiene un botón en el pin B0 del ya que aquí se encuentra una interrupción externa, la cual espera un "1"lógico por lo tanto el pin lo tenemos a tierra con una resistencia de 4.7k Ω, cuando este se presiona enciende o paga el sistema (depende el estado anterior). También cuenta con dos entradas analógicas las cuales están ubicadas en los pines A0 y A1 y se configuraron para tener una resolución de 10 bits, se lee el valor analógico y cuando no existe presencia arrojan un valor constante, pero cuando censa un objeto debido a que son de diferentes colores manda un voltaje diferente, por lo tanto se consideró como cualquier cambio mayor a 100 unidades de la señal de 10 bits puede ser considerada como que detecto un objeto **[**2], como se muestra en la figura3.

Figura3. Sensor TCS230

El sensor TCS230 cuenta con 4 led para iluminar el objeto, además de 2 pines para seleccionar los filtros y otros dos para escalar la frecuencia de salida, como se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Escalas de frecuencia y filtros

Escalar Frecuencia			Filtros		
S0	S1	Valor	S2	S3	Color
0	0	0%	0	0	Rojo
0	1	2%	0	1	Azul
1	0	20%	1	0	Sin Filtro
1	1	100%	1	0	Verde

Cuando el sensor de presencia detecta una botella, el sensor 1, enciende los led y se inicia el ciclo para determinar el color del objeto, el cual consta de captar la frecuencia del objeto con cada uno de los filtros antes mencionados, las frecuencias captadas se almacenan en un arreglo que una vez lleno se compara con la frecuencia obtenida experimentalmente para cada uno de los colores. Se decidió usar el pin B1 del microcontrolador para determinar la frecuencia, ya que este cuenta una interrupción externa, cuando entra en la interrupción tomamos el valor del timer 3 (este es de hasta 16bits) y cuando vuelve a cambiar de estado el pin tomamos el tiempo de nuevo, repetimos este proceso 10 veces y con esto tomamos el ancho de pulso de 10 pulsos, con esto se hace un promedio de para obtener una frecuencia promedio.

Se utilizaron los pines C0 y C1 ya que estos cuentan con PWM por hardware para controlar los servomotores, se fijó una frecuencia a 50Hz y previamente se mandó el ancho de pulso necesario para que este tome la posición angular deseada. El diagrama de flujo del proceso se muestra en la figura 4.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

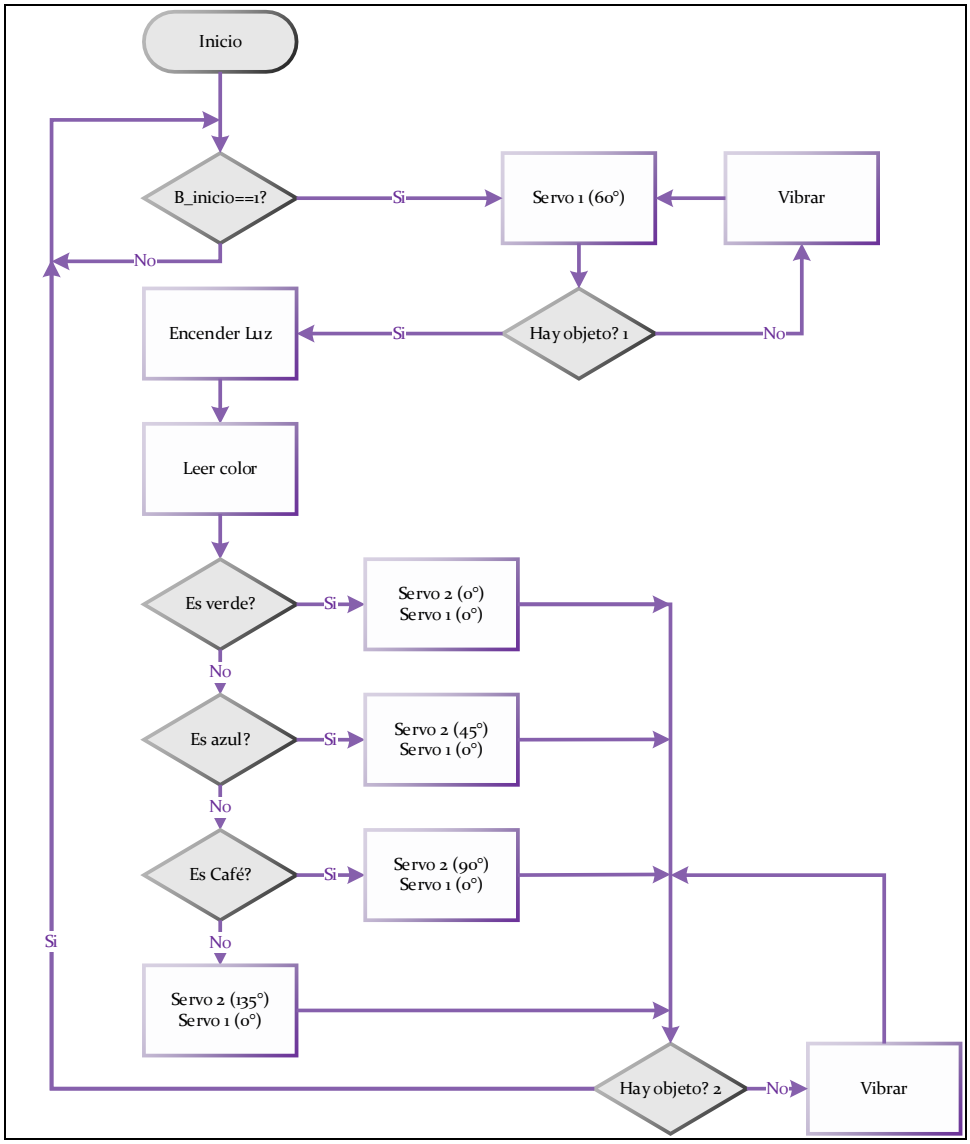
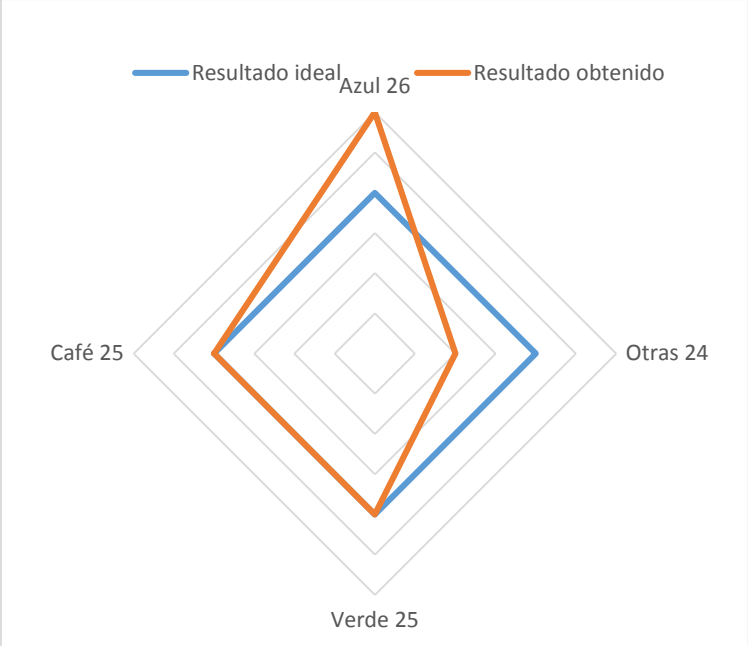


Figura 3. Diagrama de flujo del proceso

5. Análisis de resultados

Para evaluar el sistema de control se construyó un prototipo a pequeña escala utilizando esferas de vidrio de colores (canicas) para con este evaluar el desempeño de los sensores, así como la cantidad de aciertos, según los colores. Para evaluarlo se ingresaron 100 canicas 25 azules, 25 verdes, 25 cafés y 25 de diversos colores que no eran verdes, azules o cafés, estas de manera aleatoria y se verifico físicamente la cantidad de aciertos del prototipo en cuanto al color. Los resultados se muestran en la Grafica1.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015



Grafica 1. Análisis de resultados

6. Conclusiones y Recomendaciones

Gracias a los conocimientos en el área Mecatrónica, aprendidos en la universidad, fue posible diseñar un dispositivo separador de botellas por colores que resolviera el problema presentado en la empresa e irse integrando a la solución de problemas en las pequeñas y medianas empresas, por ejemplo el de esta recicladora. La correcta selección de los sensores y el microcontrolador, así como un diseño de mecanismo apropiado dieron como resultado un sistema que cumple en su totalidad las expectativas del proyecto.

El costo para la implementación de este dispositivo es relativamente bajo, teniendo en cuenta que gracias a él se estará aumentando la estética del producto final, el aplicar la tecnología en proyectos sustentables ayuda a proteger el medio ambiente además generando remuneraciones económicas.

Se recomienda cuidar la posición de los sensores ya que pueden ser perturbados por fuentes externas de luz además de trabajar con botellas con bajos porcentajes de polvo en su superficie, para asegurar que permita clasificar la botella correctamente según su color y utilizar botellas de un tamaño estándar para que el sistema pueda trabajar de manera coordinada, evitando problemas con botellas atascadas.

Referencias

[1] Angulo J., Romero S., Angulo I. *"Microcontroladores PIC: Diseño práctico de aplicaciones 2da parte",* McGraw-Hill, España, 2da edición, 2006.
[2] Paul Levi, Serge Kernbach. "Symbiotic Multi-Robot Organisms: Reliability, Adaptability, and Evolution". Springer, 1ra edición, Alemania 2010.
[3] José Roldán Viloria. *"Motores de corriente continua",* Paraninfo, S.A., España, 1ra edición, *2014*.

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

42. Diseño e implementación de un sistema de rehabilitación para los dedos de la mano.

Pérez Cárdenas Diego, Charre Ibarra Saida Miriam, Jorge Gudiño Lau, Osorio Alcalá Edgar Fabián, Macías Elizondo Aldo

scharre@ucol.mx;

Universidad de Colima
Facultad de Ingeniería Electromecánica
Manzanillo, Colima, C.P. 28860

Resumen

El presente trabajo muestra el diseño y construcción de un mecanismo de rehabilitación para los dedos de la mano, así como el desarrollo de un controlador PID utilizando el software Simulink ® de Matlab®, para manipular la posición angular de un conjunto de motores que ejercen movimiento en cada uno de los dedos. El sistema desarrollado cuenta con una interfaz de usuario que permite seleccionar rutinas y observar gráficamente los resultados. Brindando una posibilidad de mejorar el estilo y calidad de vida de las personas en la vida diaria.

Palabras clave: Rehabilitación, Flexión, Control PID, Adquisición de Datos, Matlab.

1. Introducción

Enfermedades tales como artritis, esclerosis múltiple, infartos, derrames cerebrales o accidentes originados por los riesgos que vivimos las personas en la vida diaria, pueden dañar alguna parte del cuerpo ocasionando la disminución o pérdida de las funciones motoras, por lo que se hace necesario un fisioterapeuta para la recuperación, quien determina los ejercicios físicos adecuados para cada caso, muchas veces basado en la experiencia adquirida y en la explicación que dé el paciente.

La rehabilitación física se puede dividir principalmente en dos tipos:

Activa: El paciente es el encargado de mover su extremidad.
Pasiva: El fisioterapeuta origina el accionar de la extremidad del paciente [1].

En la actualidad el uso de robots y/o exoesqueletos en rehabilitación tiene dos aplicaciones fundamentales [2]:

- Durante movimientos activos del paciente, el robot almacena información de la realización del movimiento (posición, velocidad y fuerza, entre otros), con la cual se pueden ver los avances y optimizar las rutinas de ejercitación.
- Asimismo, se pueden provocar movimientos pasivos o resistivos de la extremidad del paciente la cual es sujetada por el robot, sustituyendo en éste caso al fisioterapeuta.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Algunos de los robots dedicados a tareas médicas tienen como propósitos particulares el desarrollo de prótesis robóticas, sistemas de ayuda a discapacitados, dispositivos de rehabilitación, entre otros. Sin embargo, los desafíos son aún numerosos. Los sistemas de actuación, las condiciones de operación en espacios reducidos, la viabilidad de la construcción y la similitud con la anatomía humana representan todavía todo un reto [3].

La aplicación de robots en la rehabilitación de las manos no solo se limita a medir el progreso del paciente, sino que también sirve para ejercitar los músculos dañados y para entrenar las manos, y a su vez apoya a los médicos en la tarea de evaluar el grado de discapacidad y así mismo les brinda la oportunidad de generar rutinas personalizadas [4].

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de mecanoterapia que le sirva de herramienta al fisioterapeuta en el diagnóstico y rehabilitación de los dedos de la mano. Se optó implementar un controlador PID debido a su fácil y rápida manera de sintonizar y por el contrario la lógica difusa permite una gran flexibilidad, pero es difícil de implementar, debido al gran número de líneas y señales requeridas [5].

2. Desarrollo

2.1 Diseño del Prototipo

En la Figura 1 se presenta el diagrama a bloques del sistema de rehabilitación diseñado. Se cuenta con una computadora, en la cual se programó un controlador para manipular los servomotores que ocasionan el movimiento requerido por el paciente en cada uno de los dedos de la mano, utilizando un guante ergonómico.

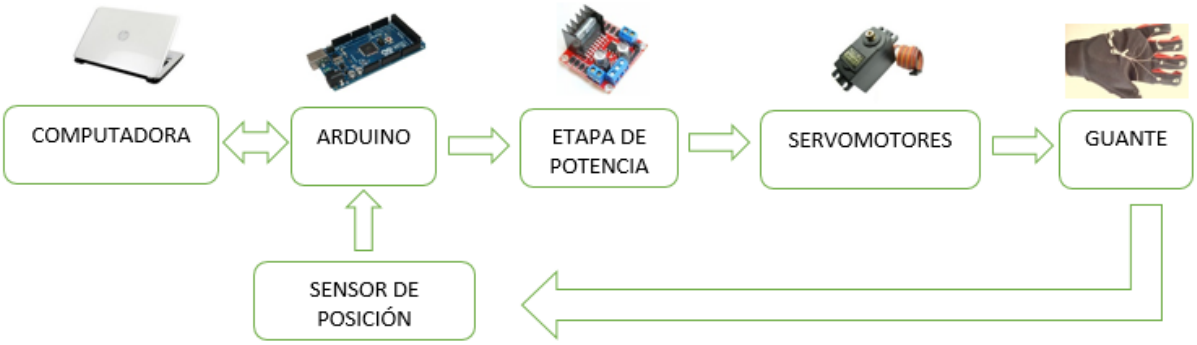


Figura 38. Diagrama de bloques del sistema.

Goniometría es la técnica de medición de los ángulos creados por la intersección de los ejes longitudinales de los huesos a nivel de las articulaciones. Y tiene como objetivo evaluar la posición de una articulación en el espacio (Figura 2) [6].

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

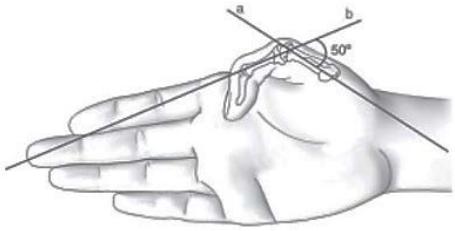


Figura 2. La articulación del pulgar se encuentra fija en 50°de flexión.

Se consideraron los ángulos de flexión establecidos para los dedos, ya que si éstos son sobrepasados se puede generar una lesión al paciente, lo cual resultaría una contradicción, en la Figura 3 se observan los ángulos promedios de flexión de las 3 principales articulaciones de los dedos [6].

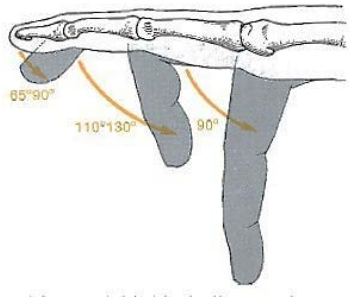


Figura 3. Ángulos de flexión.

A diferencia de los anteriores el dedo pulgar presenta una flexión de 45 a 60° para conducirlo frente al dedo meñique, tratándose de un movimiento de presión o cierre de la mano (Figura 4) [7].

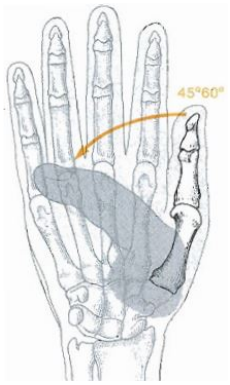


Fig. 4. Flexión del dedo pulgar.

En la Figura 5 se muestra el guante que sirve para realizar la flexión de cada uno de los dedos en base a las rutinas programadas, por lo que se le agregaron argollas las cuales funcionan como guías. Se eligió este sistema mecánico debido a que la implementación de cilindros neumáticos ha demostrado presentar el inconveniente de no permitir el cierre completo de la mano [8].

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Fig. 5. Guante.

El sistema cuenta con una base acolchonada para apoyar la mano y el antebrazo, como se observa en la Figura 6, esto tiene como fin brindar confort al paciente a la hora de realizar las rutinas, además asegura que el movimiento será únicamente de los dedos y no de algún otro miembro de la mano.

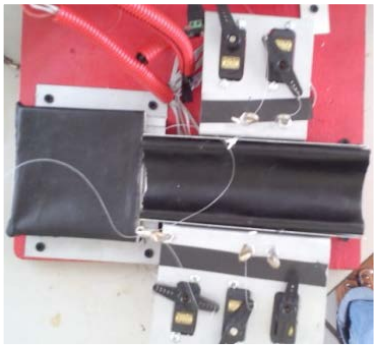


Figura 6. Base soporte.

Uno de los puntos importantes de este sistema es la posición inicial de avance de los motores así como la ubicación de cada uno de ellos, ya que estos deben jalar lentamente los dedos, por lo que fue necesario que se fijaran en una base de aluminio (Figura 6).

Mediante el control de los motores se logra el movimiento de los dedos, a través de tendones implementados con hilo de cáñamo conectados a ellos. Se colocaron guías en la base para que el hilo mantuviera una trayectoria fija, ésto se aprecia en la Figura 7.

2.2 Componentes electrónicos

Para la etapa de adquisición de datos se usó un Arduino Mega 2560 (Figura 8), que posee 54 pines digitales y 16 pines analógicos de entrada, un microcontrolador ATmega2560, una EEPROM de 4 kB y un Cristal de Cuarzo de 16 MHz. Los puertos analógicos se utilizan para el set-Point y los puertos digitales para la salida hacia los motores mediante un PWM (Modulación por Ancho de Pulsos).

Como se observa en la Figura 9, se utilizó un Puente H L298n en la etapa de potencia, el cual se caracteriza por ser un circuito doble que puede manejar hasta 2 A. Mediante él los motores reciben la

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

señal de control enviada por la computadora a través del Arduino, el cual solo funciona como una tarjeta de adquisición de datos.

Fig. 7. Montaje de los motores.

Fig. 8. Arduino Mega 2560.

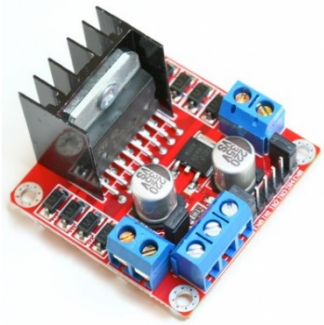


Fig. 9. Puente H.

2.3 Interfaz

El sistema está diseñado en arquitectura abierta uniendo hardware y software interactivo. Cuenta con una interfaz creada en el software Simulink® de Matlab® y el entorno de programación visual GUI. Como se aprecia en la Figura 10, la interfaz se encuentra compuesta por tres botones: **Rutinas, Gráficas e Iniciar**. Al presionar el botón **Rutinas** automáticamente se leerá la posición actual de los motores y se definirá ésta como el Set-Point; esto se realiza como un diagnóstico previo a la terapia,

para evitar esforzar de más los tendones del paciente. El botón **Iniciar** controla el inicio y el paro del programa en Matlab. Al dar clic sobre éste, los motores quedan automáticamente apagados, esto es para evitar que se inicie una rutina antes de que sea seleccionada.

Se cuenta con una lista de rutinas, y, dependiendo de cuál sea seleccionada, se activaran en el programa del controlador los motores correspondientes. La **Rutina completa** consiste en poner en funcionamiento todos los motores.

Figura 10. Interfaz principal.

Por último, el botón **Gráficas**, al ser seleccionado despliega una ventana en la cual se muestran tres gráficas, las cuales corresponden a la posición del motor con respecto al tiempo, error y señal de salida del controlador. También cuenta con una lista, en la cual se elige el dedo del cual se desean graficar los parámetros, tal como se aprecia en la Figura 11.

2.4 Controlador

Se programó el controlador del sistema en la plataforma Simulink® del software Matlab®, en la Figura 12 se presenta el diagrama de bloques. En el programa se realiza la lectura de la posición del motor, posteriormente se convierten los niveles de voltaje en grados, a continuación se genera una señal cuadrada, la cual tiene como amplitud el máximo número de grados que cada motor genera; ésta va conectada a un bloque de saturación, el cual tiene como límite superior el ángulo máximo de flexión soportado por el paciente. A esto se le resta el ángulo inicial obteniendo así el Error que es introducido a un bloque PID, el cual genera una señal de control que es enviada a dos bloques de saturación, esto como protección del dispositivo. Por último, se cuenta con dos bloques de PWM, uno de ellos genera el giro en sentido positivo del motor y el otro genera el giro en sentido negativo.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

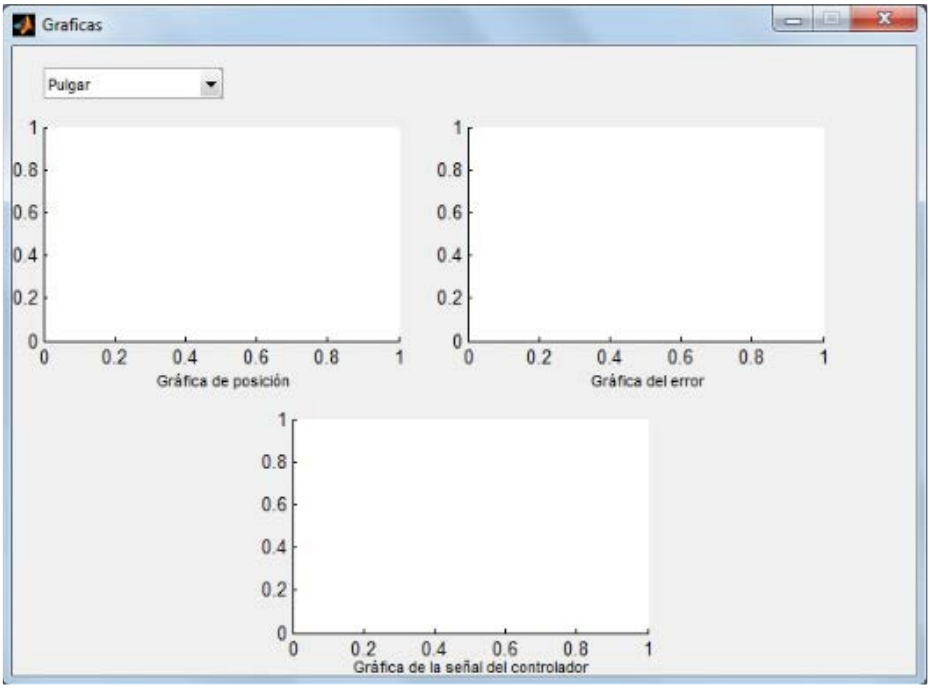


Figura 11. Interfaz: Gráficas.

El controlador funciona conforme a la opción que se seleccione en la interfaz. Al seleccionar **Rutinas** en la interfaz GUI, ésta envía hacia el controlador la opción seleccionada por lo que se activan los puertos del Arduino y el controlador PID mandan señal mediante las conexiones físicas a los Puentes H para después pasar a los servomotores.

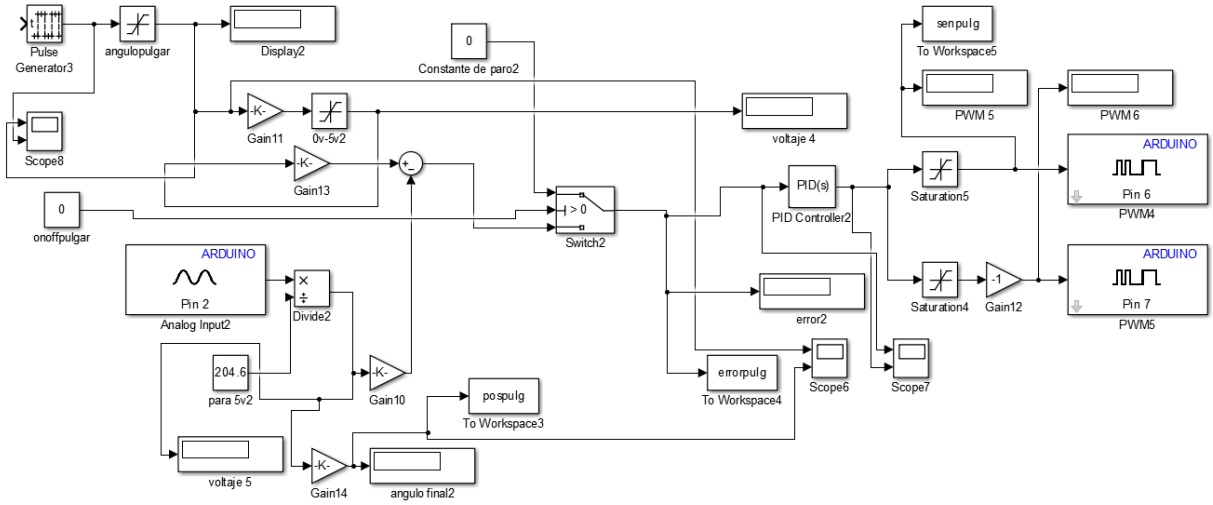


Figura 12. Controlador PID de un motor en Simulink.

2.5 Sistema de rehabilitación para los dedos de la mano

En la figura 13 se observa el sistema de rehabilitación completo con su interfaz a la computadora para el monitoreo y control de la flexión de los dedos de la mano.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

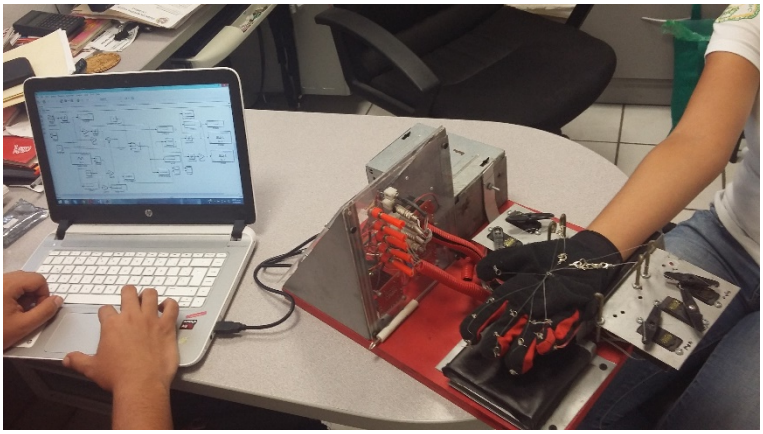


Figura 13. Sistema de rehabilitación.

3. Resultados

Para comprobar el funcionamiento del sistema de rehabilitación se realizaron pruebas con cada uno de los dedos de la mano, a continuación se presentan los resultados del pulgar e índice.

Los resultados del dedo índice se observan en la Figura 14. El tiempo que tardo en posicionarse en el Set Point fue de 1.2 s. Se observa que a partir de 0.4s se generó un sobre impulso de 8°, el cual se encuentra dentro de los límites de movimiento del dedo.

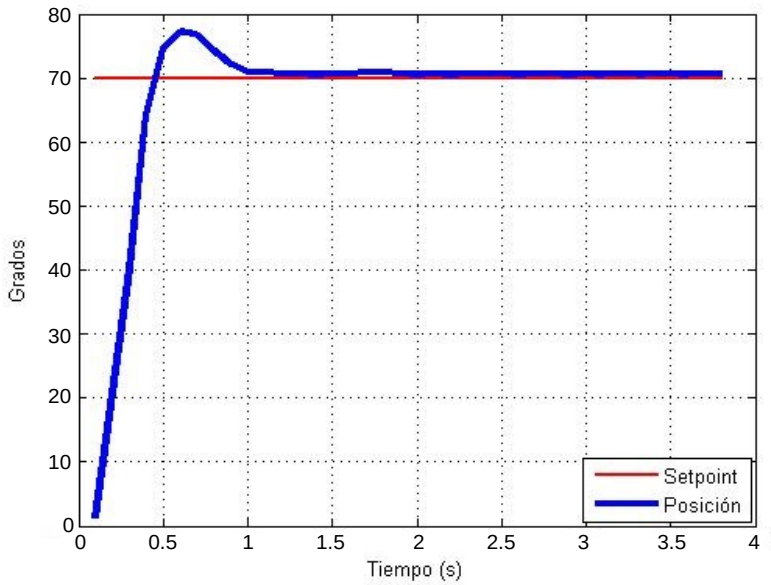


Figura 14. Posición dedo índice

En la Figura 15 se muestra la señal de error que tuvo el dedo índice. A partir de 1.2s el error corresponde a 1°, por lo que se comprueba el correcto funcionamiento del controlador PID aplicado.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

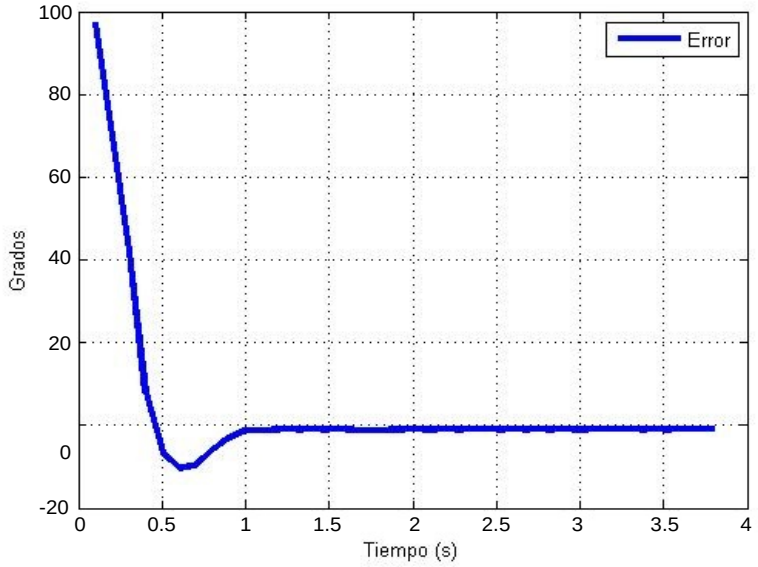


Figura 395. Error dedo índice

En la Figura 16 se presenta la señal de control aplicada al actuador para lograr la posición deseada.

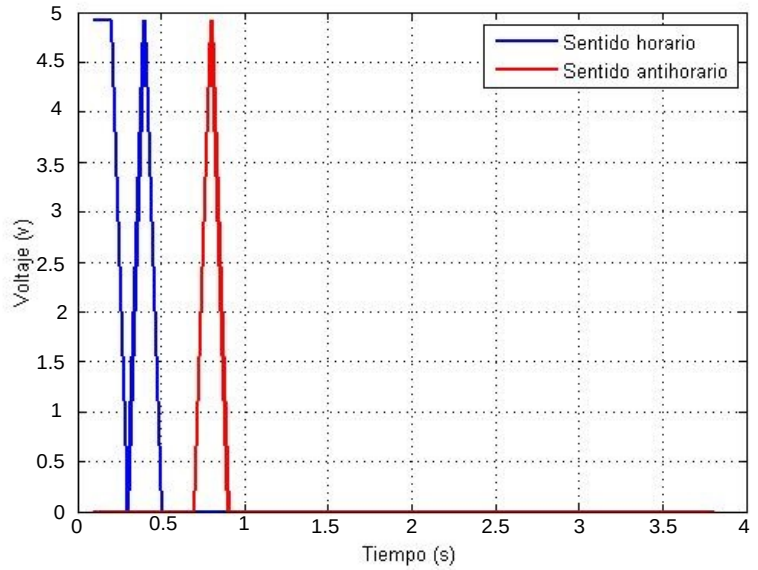


Figura 406. Señal de control dedo índice.

Los resultados del dedo pulgar se observan en la Figura 17. El tiempo que tardo en posicionarse en el Set Point fue de 1.2 s y la señal no presento sobre impulso.

En la Figura 18 se muestra la señal de error que tuvo el dedo índice. A partir de 1.2s el error es 1° por lo que se comprueba el correcto funcionamiento del controlador PID aplicado.

En la Figura 19 se presenta la señal de control aplicada al actuador para lograr la posición deseada. Se observa que la señal corresponde solo al giro en sentido horario, debido a la ausencia de sobre impulso.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

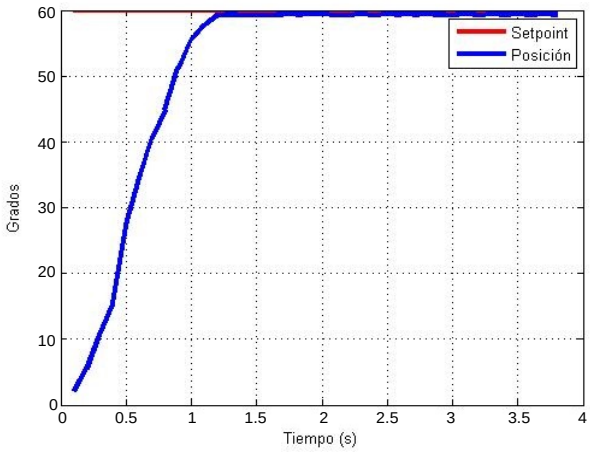


Fig. 17. Posición dedo pulgar

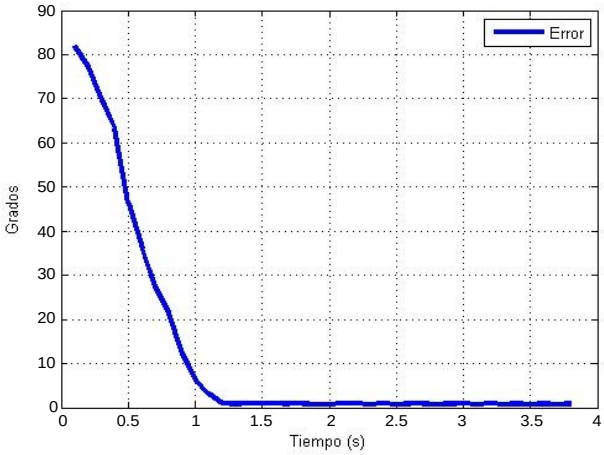


Fig. 18. Error dedo pulgar

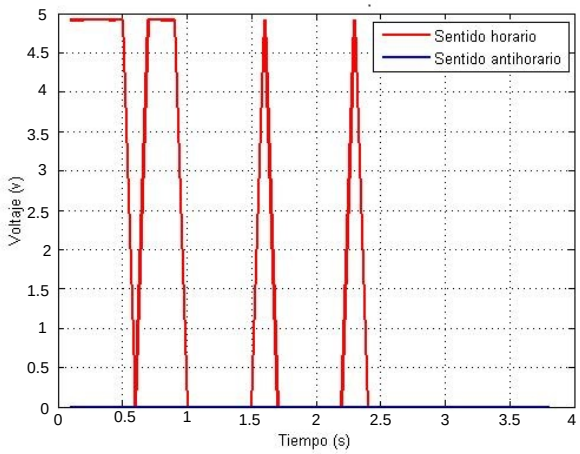


Fig. 19. Señal de control dedo pulgar.

4. Conclusiones

La rehabilitación a menudo se convierte en el entrenamiento de una articulación mediante ejercicios repetitivos, y es ahí donde los robots y las nuevas tecnologías pueden aportar mucho, proporcionando también información importante para el especialista que supervisa la terapia.

El sistema diseñado se encuentra en arquitectura abierta, por lo que es escalable y modificable, cada una de las etapas puede ser sustituida por su equivalente que trabaje con los mismos niveles de señal.

El análisis de resultados demostró que el sistema cumple la función para la cual fue diseñado, proporciona repetitividad y puede reducir la dependencia de un especialista, siendo una ventaja proporcionada por la ingeniería en el área de la salud.

Referencias

[1] Ayala-Lozano J., Urriolagoitia-Sosa G., Romero Angeles B., Torres-San Miguel C., Aguilar-Pérez L., Urriolagoitia-Calderón G. *"Diseño mecánico de un exoequeleto para rehabilitación un miembro superior", Rev. Colomb. Biotecnol.* Vol. XVII, No.1, 79-90, 2015.

[2] Sabater J., Azorín J., Pérez C., García N. y Menchón M. *"Ayuda robótica para la rehabilitación de miembros superiores, 2do Congreso Internacional sobre Domótica, Robótica y Teleasistencia para Todos".* DRT4all 2007. 19-28.

[3] Ruiz R., Aguilar F., Oliver M. y Szwedowicz D. *"Diseño, construcción y control de un dedo conformado por músculos neumáticos, Congreso Anual 2009 de la Asociación de México de Control Automático".* AMCA 2009. 5-6.

[4] Chen H. y Wang Q. *"Design of the Workstation for Hand Rehabilitation Based on Data Glove, 2010 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine Workshops".* IEEE 2010. 771.

[5] Santoja I. *"Diseño e implementación de sistemas de control aplicados a un exoesqueleto para la rehabilitación de la mano".* Tesís. 135-137.

[6] Taboadela C. *"Goniometría"*, Asociart SA, Argentina, 2007. ISBN 978-987-9274-04-0.

[7] Rouvière H., Delmas A. *"Anatomía humana",* Masson, España, Undécima edición, 2005. ISBN 2-294-00393-4.

[8] Enriquez S., Narváez Y. y Vivas O. *"Sistema robótico de tipo exoesqueleto para la rehabilitación de la mano, XXXV Jornadas de Automática ".* CEA-IFAC 2014. 310-311.

Desarrollo de Software y Hardware en Mecatrónica
ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

43. Programación de un autómata para una Prensa Hidráulica para block de sal

Martínez Martínez Verónica, Rodríguez Lemus Rubén, Vivanco López José Edgardo, Juarez Valenzuela Mónica Del Carmen, Cervantes Díaz Martha.

vmartinez@utj.edu.mx, rrodriguez@utj.edu.mx, edgardo.vivanco.lopez@utj.edu.mx, monica.juarez@utj.edu.mx, mcervantes@utj.edu.mx

Universidad Tecnológica de Jalisco

Resumen

El objetivo es realizar la programación de un PLC como parte de la reingeniería de la prensa, la cual nos otorga el correcto funcionamiento de sincronización de tiempos y control automático de cada actuador, hasta la expulsión del bloque. Para lograr la disminución de demoras, perdidas de producto, aumento de producción a un 60%. Se inicia con una investigación del funcionamiento de la prensa y necesidades del cliente dándonos una especificación de los eventos, se realiza un dibujo de las partes generales, estudio de movimientos de cada actuador, tiempos de sincronización, estudio previo de fuerzas para el cambio de partes mecánicas, ventajas y desventajas del equipo que realizara el control de la prensa. Se realizó Se incrementó la producción diaria de 240 a 800 bloques equivalente a un 330%.

En el sector de micros y pequeñas empresas mexicana enfocada en la industria de la transformación se tiene una deficiencia en sus procesos documentados, esto dificulta la agilización de mejora, debido que se tiene que realizar un investigación de primera mano de los operadores, para después corroborarla con el quipo en todas sus secuencias, así como no se tiene bitácoras de mantenimiento preventivo ni predictivo, solo correctivo, después de dejar establecido los parámetros y sus manuales de operación se cambia la visión de un mantenimiento preventivo, para ellos la realización de este tipo de manuales es pérdida de tiempo porque no cuentan con el personal capacitado para realizarlo y el personal que si cuenta con estos conocimientos no tiene el tiempo por cubrir las necesidades de producción.

La industria mexicana tiene mucha necesidad de personal capacitado que ayude a brindarle un mejor servició a sus procesos para que no dependa de mano extranjera, este sector sigue siendo muy bajo en la población de egresados del área de ingeniería. Un análisis que muestra "Brechas. Estado de la Educación en México 2010", señala que de cada 100 niños que entran a la primaria, sólo 45 logran terminarla en nueve años, y que del total de los menores que ingresan al primer ciclo, sólo 13% termina una licenciatura así lo señaló el presidente de la organización Mexicanos Primero, Claudio González Guajardo. Del total de alumnos, solo el 3.8% egresan de las carreras de Ciencia y Tecnología, Fuente coordinación de Planeación Educativa de la SEJ, ciclo escolar 2007-2008. Esto significa que de acuerdo a los resultados presentados por el análisis Brechas y de la fuente de SEJ, de cada 100 niños que entran a la primaria solo 13 termina la licenciatura y de estos 13 escasamente el 0.494% termina estudios relacionados con la ciencia y la tecnología.

Palabras clave: Programación de autómata, PLC, Cubos de Sal, Prensa Hidráulica.

1. Introducción

El término automatización se refiere a una amplia variedad de sistemas y procesos que operan con mínima o sin intervención del ser humano. Un sistema automatizado ajusta sus operaciones en respuesta a cambios en las condiciones externas en tres etapas: mediación, evaluación y control.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

La automatización en un equipo industrial transfiere tareas de producción, realizadas habitualmente por operadores humanos a un conjunto de elementos tecnológicos.

Un equipo automatizado consta de dos partes principales:

- Parte de Mando.
- Parte Operativa.

La parte operativa es la parte que actúa directamente sobre la máquina. Son los elementos que realizan los movimientos para que la máquina se mueva y realice la operación deseada. Los elementos que forman la parte operativa son los actuadores de las máquinas como motores, cilindros, compresores y elementos de entrada de señales como sensores, interruptores, fotodiodos, finales de carrera que se encargan de mandar órdenes o indicaciones.

La parte de mando es el cerebro que controla a la parte operativa algunos de ellos pueden ser un como un controlador lógico programable, una tarjeta de adquisición de datos, un micro controlador.

“En síntesis, la Automatización Industrial se puede entender como la facultad de autonomía o acción de operar por sí solo que poseen los procesos industriales y donde las actividades de producción son realizadas a través de acciones autónomas, y la participación de fuerza física humana es mínima y la de inteligencia artificial, máxima. Recordemos que ésta es producto de la inteligencia natural, pero su manifestación en los sistemas de control es mediante la programación en los distintos tipos de procesadores, por lo que es artificial” Fuente especificada no válida.

Muchos sistemas automatizados en el sector industrial nacional se manipulan a través de un equipo llamado Controlador Lógico Programable (PLC), que permite modificar un sistema de control sin tener que volver a alambrar las conexiones de los dispositivos, son robustos y están diseñados para resistir vibraciones, temperaturas, humedad y ruido. Estos dispositivos también tienen la ventaja de ser muy sencilla la programación en escalera así como el entendimiento de sus cinco lenguajes de programación que implementan, el cual se basa en operaciones de lógica y conmutación.

La empresa **Sales del Golfo de Cortés S.A. de C.V** es una procesadora de sal, que tiene una amplia gama de productos alimenticios y ganaderos. Y está interesada en utilizar la automatización como solución para optimizar y mejorar el control de sus procesos en especial aquellos relacionados con block de sal. Su materia prima se compra a diversas empresas nacionales, y así el proceso da inicio con la llegada de la sal a la planta donde se almacena, selecciona y es destinada a los procesos para cada tipo de producto.

La sal reservada para alimento de ganado, es procesada de acuerdo a las necesidades requeridas por el cliente y se procesa en las siguientes clasificaciones: mineralizada, fosfatada, molida tipo P,G,S.N, estándar, granulada, martajada, triple, desparasitante, energetizante y block para caballo. Los productos que se ofrecen en forma de block son transportados de forma manual hacia la prensa hidráulica para compactar la sal de forma de cubos.

La operación completa de la prensa hidráulica incluye seis tolvas divididas en dos partes, tres de cada lado de la máquina para fabricar dos bloques simultáneos, cada bloque que se produce está fabricado con tres minerales de color diferente. En el proceso anterior las tolvas eran llenadas de sal manualmente, para posteriormente pasar a los contenedores y continuar a los llenadores, la división entre la tolva-contenedores y contenedores-llenadores se encuentran unas placas que eran controladas por unos resortes, los llenadores son movidos para continuar hacia los moldes, son estos tres actuadores en secuencia que eran activados individualmente, provocando el prensado después de cumplir el tiempo establecido.

El problema de la prensa radicaba en el funcionamiento del proceso desde la tolva hasta los llenadores, ocasionando pérdidas de producto, demora de producción en la reparación de los contenedores y llenadores por su mala sincronización, el vaciado hacia los moldes era incompleto por el producto, provocando pérdida de tiempo porque el operador llenaba directamente los moldes para

agilizar el proceso de forma manual, siendo el recorrido desde el contenedor general del almacén donde se encontraba la sal ya preparada con los minerales, la única parte que parcialmente servía era el prensado y expulsión, aun así tenían problemas con la activación o desactivación de los pistones por errores de sensado, donde eran activados manualmente el prensado y expulsión por el operador, con este procedimiento se generan en promedio 240 bloques en un turno.

El objetivo es realizar la reingeniería de la prensa para el correcto funcionamiento de sincronización de tiempos y control automático de cada actuador, hasta le expulsión del bloque. Esta información se obtuvo a partir de varios medios desde entrevistas directas con operadores y personal a cargó, observación del proceso en sitio y también con las personas interesadas con la automatización del proceso, documentando estos puntos en las necesidades del cliente. Esto nos permite la elaboración de una especificación de los eventos que será la base para la programación del autómata programable.

Se realiza una investigación del funcionamiento de la prensa como se encuentra funcionando en esos momentos, realizando un dibujo de las partes generales, estudio de movimientos de cada actuador, tiempos de sincronización, estudio previo de fuerzas para el cambio de partes mecánicas, ventajas y desventajas del equipo que realizara el control de la prensa, realizando un croquis de la prensa como se ilustra en la figura 1. Esto se documenta para generar la filosofía de control, en donde se muestra una solución al problema por medio de componentes automáticos y automatismos, incluyendo características y ventajas que permiten una elección adecuada de estos dispositivos.

Todo esto nos ayuda a que preliminarmente nuestro objetivo inmediato sea la disminución de tiempos muertos, perdidas de producto y un aumento de producción a un 60%.

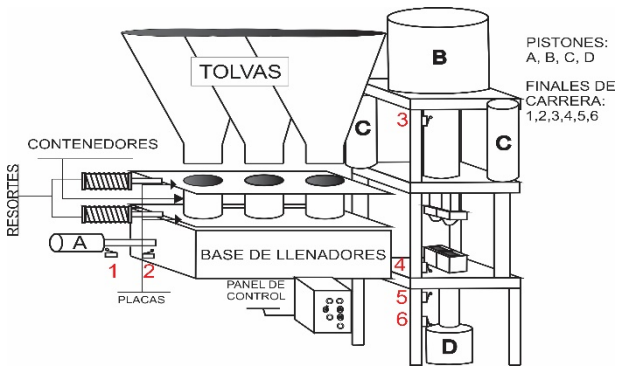


Figura 1: Croquis de la Prensa Original.

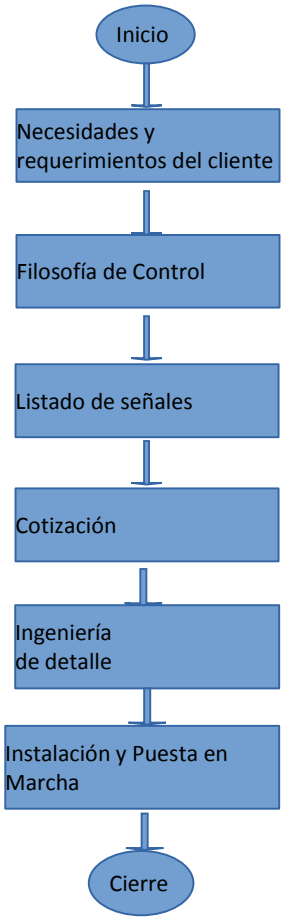
La automatización se realizó con un PLC, así como el cambio de los resortes por actuadores lineales que generan el movimiento mecánico. La sincronía de todos estos eventos provocados por los elementos de la prensa fue realizada por un programa encargado de los encendidos, apagados, activaciones y lógicas de operación de los dispositivos, este programa fue descrito en forma de especificación de eventos en las partes preliminares y después se utilizó el Graphcet como forma de estructurar los eventos que se realizaban en una forma de una secuencia temporizada, después estas conformarían la base para la programación en el PLC en un diagrama de escalera. Esta automatización también requirió de instalar un tablero y su alambrado permitiendo con todo esto en conjunto de que el comportamiento de la prensa cambio disminuyendo tiempos muertos, aumento en la producción por día, incrementado ganancias y seguridad para los operadores.

2. Reingeniería de la prensa.

2.1 Metodología Utilizada

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Se reutilizan metodologías y procedimientos utilizados en Gestión de proyectos automáticos, en conjunto con procedimientos para ingeniería de software y Administración de proyectos (PMI, 2004). Por lo que se siguió una estructura para la reingeniería como se muestra en el siguiente Diagrama de Flujo de la Figura 2.



En esta etapa del proyecto se realizan observaciones y entrevistas a diferentes actores relacionados con la prensa hidráulica y se genera un listado de muy diversos puntos en donde se encuentra la información necesaria para conformar una especificación y una filosofía de control.
Este segmento se genera un documento basado en una lista generada por las necesidades y requerimientos del cliente, además el documento incluye una proyección de una solución con dispositivos automáticos discrepando y discutiendo las ventajas, desventajas y características de los del equipos automáticos, modos de control y sistemas elegidos. Tiene el mismo nombre que la etapa.
Este segmento se genera un documento basado en una lista generada por las necesidades y requerimientos del cliente, además el documento incluye una proyección de una solución con dispositivos automáticos discrepando y discutiendo las ventajas, desventajas y características de los del equipos automáticos, modos de control y sistemas elegidos. Tiene el mismo nombre que la etapa.
Esta etapa son varios subprocesos para lograrla primero se realiza una lista de materiales con sus proveedores y sus tiempos de entrega. Se realiza una programación de actividades de las cuales obtenemos los recursos por utilizar y el costo de la mano de obra. Y se le presenta al cliente.
Esta sección consta de realizar los diagramas a utilizar por el proyecto, por lo general están divididos en su especialidad :Mecánicos, Eléctricos, Neumáticos, Hidráulicos etc.
Aquí son los procedimientos que se realizan para la instalación del equipo en planta, las pruebas realizadas a los equipos sin producto, La programación y configuración de algunos de los dispositivos instalados y por útimo se realizan pruebas funcionales con producto.

Figura 2: Diagrama de flujo.

Ahora bien para la sección de programación del autómata programable necesitamos que varias etapas de nuestro proyecto automático estén terminadas y necesitamos la información de primera mano por que a pesar de que la programación está considerada dentro de Instalación y Puesta en Marcha es necesaria la información de otras secciones, por lo que el siguiente Diagrama muestra como la información fluye de los diferentes documentos hacia la programación del Autómata, ver figura 3.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

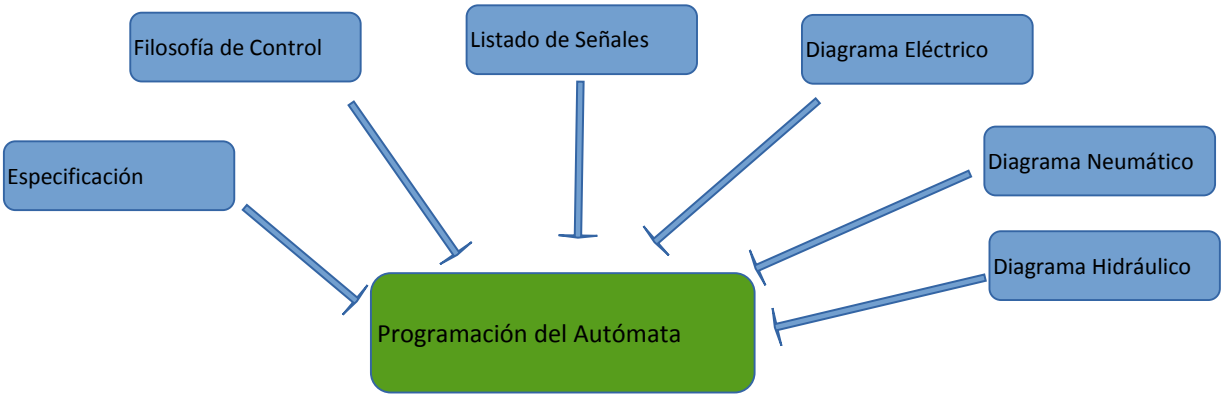


Figura 3: Etapas del proyecto.

Podríamos hacer también mención que se utilizó en un inicio el Graphcet debido a que el proceso se le identificó como secuencial lo cual nos trae una sencillez en su descripción de los eventos relacionados. Se pensaría que también que los elementos mecánicos influirían en realización de la programación, pero debido a que no se requirieron diagramas porque se trataba una substitución de piezas no entran dentro de nuestra metodología.

2.2 Especificación

Ahora bien para la realización de la reingeniería es necesario desglosar las partes más importantes que componen a la prensa y su utilización, siendo las siguientes:

- Tolvas: es la parte destinado para el depósito, canalización y fragmentación de la sal.
- Contenedores: Depósitos de la sal antes de llegar a los llenadores, material del que están hechos son de metal.
- Moldes: Recipiente donde es introducida la sal, están hechos de metal y su diámetro interior fue elaborado para que los punzones entraran con facilidad, lo anterior se ilustra en la figura 4.

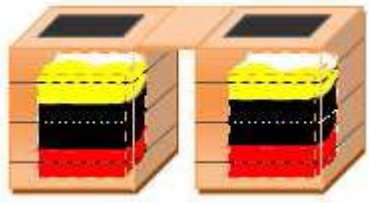


Figura 4. Dibujo de moldes para block de la prensa.

- Pastillas: Se encuentran en el interior de los moldes, son manipuladas por un pistón hidráulico, estas pastillas pueden ser cambiadas para la elaboración de block ppodran ser de diferente tamaño.
- Punzones: Los punzones sirven para el prensado de la sal, son manipulados por un pistón hidráulico.

A continuación se describe, localiza y analizan las partes mecánicas a reutilizar, acoplar o mejorar y medir los componentes principales para proceder a realizar el cambio de las partes de la prensa necesarias para el control, adaptación, por motivos de confidencialidad solo se enlista las partes que la componen siendo las siguientes:

- Distancia del vástago que manipula los llenadores.
- Diámetro de los contenedores.
- Altura de los contenedores.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

- Diámetro de los llenadores.
- Altura de los llenadores.
- Ancho de la base de los llenadores.
- Medida de los punzones.
- Medida de las pastillas.
- Largo de las placas.
- Ancho de las placas.

Se tomaron los tiempos de la función de los siguientes elementos:

- El tiempo en que tarda en bajar y subir el pistón D.
- El tiempo en que tarda en bajar y subir el pistón E.
- El tiempo en que tarda en bajar y subir el pistón F.
- El tiempo en el que el operador llena de sal los moldes.
- El tiempo del proceso.

2.2 Filosofía de Control

El cambio de los resortes por actuadores se ilustra en la figura 5, quedando el croquis diseñado de la prensa con las modificaciones para su funcionamiento.

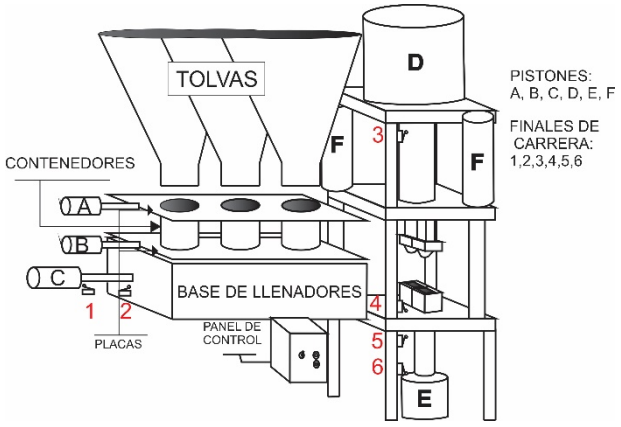


Figura 5. Dibujo del rediseño del croquis de la prensa hidráulica.

Se ilustra en la figura 6, la prensa real de 300 toneladas de fuerza para la compactación de la sal, donde se continuara con él desmontaje de los resortes, que provocan la obturación del paso de la sal, se llegó a la conclusión que no son la mejor opción para la manipulación de las placas, los resortes pierden sus propiedades con el tiempo y el uso continuo de su utilización por lo cual serán sustituidos por pistones hidráulicos de doble efecto.

La fuerza total resultante que aplican los resortes para ser sustituidos por actuadores, se realizó con una prueba del equipo de fuerza siendo de un total aproximado de 300 K, los cuales se mandaron fabricar por el bajo costo, a diferencia de los fabricados.

2.3 Programación del Autómata

El siguiente paso es la realización de la programación de los movimientos de los actuadores, como se ilustración en la figura 7 la programación en Graphcet.

ISBN 978-607-9394-04-2, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2015

Figura 6. Prensa Hidráulica.

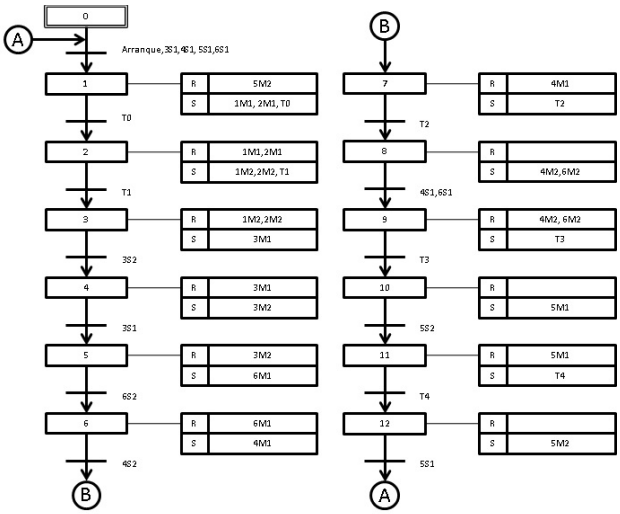


Figura 7. Grafcet de la Programación de la prensa.

3. Resultados

La mejora obtenida con la automatización fueron satisfactorio siendo de un 330 % el aumento de producción por día esto significa de 240 bloques pasaron a producir 800, diarios, provocando disminución de tiempos muertos.

Se tiene otros tipos de prensas hidráulicas en el mercado con la automatización requerida donde el precio de oscila de un equipo usado alrededor de $300,000.00 mil pesos se ilustra en la figura 8.

La automatización con el cambio de 2 actuadores, el tablero de control con el PLC fue de $53.106.63, como se ilustra en el siguiente reporte proporcionado al Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Jalisco COECYTJAL ver Imagen 6 del cual patrocino $30,000.00 y el resto por parte de la empresa Sales del Golfo de Cortes.

Figura 8. Prensa Hidráulica Inglesa.

CONCENTRADO - FONDOS COECYTJAL -

Informe Financiero Provemus

COECYTJAL

Clave de Proyecto: 03-2008-512
Nombre del proyecto: AUTOMATIZACION DE PRENSA HIDRAULICA
Institución: UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE JALISCO

Fecha: 27 DE FEBRERO 2013
Informe No: FINAL
Periodo: 18/AGO/08 AL 13/FEB2013

Partida	IdP	Total Aprobado	Modificado autorizado	Recursos del Periodo			Recursos Acumulados		
				Recibido	Ejercido	%	Recibido	Ejercido	%
VIATICOS	P1								
PASAJES	P2								
GASTOS DE TRABAJO DE CAMPO	P3					-			-
EDICIONES E IMPRESIONES	P4					-			-
SERVICIOS EXTERNOS Y COMERCIALES	P5					-			-
APOYO A ESTUDIANTES	P6	8,000.00	8000	8,000.00	8,000.00	**100%**	8,000.00	8,000.00	**100%**
ARTICICULOS Y MATERIALES Y SERVICIOS DIRECTOS	P7	22,000.00				-			-
DOC UMENTOS Y SERVICIOS DE INFORMACIÓN	P8					-			-
MATERIALES, VIVIOS, VEGETALES Y/O ANIMALES	P9					-			-
APORTACION COMPLEMENTARIA DE SULEDOS Y SALARIOS	P10					-			-
HERRAMIENTAS Y ACCESORIOS	P11		22,000	22,000.00	22,000.00	**100%**	22,000.00	22,000.00	**100%**
OTROS	P12					-			-
Total Gasto	**TG**	30,000.00	30,000.00	30,000.00	30,000.00	**100%**	30,000.00	30,000.00	**100%**
TOTAL		**30,000.00**	**30,000.00**	**30,000.00**	**30,000.00**	**100%**	**30,000.00**	**30,000.00**	**100%**

Página 1

DESGLOSE DE FONDOS CONCURRENTES

SECTOR	INSTITUCIÓN/ EMPRESA /	MONTO
Sector Académico		
Sector Privado	SALES DEL GOLFO DE CORTES SA DE CV	23,106.63
Fondos Estatales (Que no sean de COECYTJAL)		
Fondos Federales		
Fondos Internacionales		
Total	-	23,106.63

Verónica Martínez Martínez
Nombre y firma del Responsable del Proyecto

Página 2

Ana María Gonzalez Silva
Nombre y firma del Administrador del Proyecto

Figura 7. Reporte Financiero

4. Conclusiones

En el sector industrial las empresas surgen de necesidades creadas por la región, la mayoría de las veces no cuentan con información técnica necesaria de sus sistemas de procesos, el proyecto se inició con la descripción empírica de los operadores y encargados.

La obtención de la información técnica llevo tiempo el recabarla alrededor de 4 meses para tener lo suficiente para el análisis de reemplazo.

Los operadores y parte de los encargados no le dan la importancia necesaria de documentar los procesos, equipos, manuales para un mejor servicio, lo que dificulta realizar mejoras.

En México la mayoría de las empresas son micro y pequeñas empresas, donde sus sistemas o equipos son usados de los países del primer mundo esto no lleva que nuestra tecnología industrial tiene un retraso de 10 años a con respecto a ellos. Se tiene un potencial enorme con los alumnos de nivel de ingeniería que pueden apoyar a las empresas pequeñas y micro para obtener mejores resultados económicos, si son apoyados en todos los aspectos para ayudar en los procesos.

La prensa hidráulica tiene un potencial de mejora que son los siguientes:

- Se puede mejorar la automatización del traslado de la sal por medio de gusanos con transportadores a las tolvas.
- Continuar después la expulsión de bloques prensados, que pasen al horno de secado y continuar hacia la emplayadora.

Se tiene contemplado en este año iniciar con la realización del anteproyecto para la implementación de la línea de producción, del horno y la emplayadora.

5. Agradecimiento

Un especial agradecimiento en primer lugar por el financiamiento al Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Jalisco (COECYTJAL), así como todas las facilidades a la empresa Sales del Golfo de Cortes S.A de C.V para la realización del proyecto y transferencia de conocimientos a los alumnos participantes que lograron su titulación de Ténico Superiror Universitarios en Mecatrónica, sin dejar de reconocer a nuestra Casa Madre la Universidad Tecnologíca de Jalisco por la confianza brindad para la realización del proyecto.

Referencias

[1] Alvarez Pulido, M. (2007). Controladores lógicos. Barcelo, España: Marcombo.
[2] Balcells, J. (1997). Autómatas Programables. México: Alfaomega - Marcombo.
[3] Barbado Santana, J. A., Martín Sierra, J., & Aparacio Bravo, J. (2013). Automatismos Industriales. México: Alfaomega.
[4] Botlton, W. (2010). Mecatrónica. México: Alfaomega.
[5] Dounce Villanueva, E. (2007). La Productividad en el Mantenimiento Industrial. México: Grupo Editorial Patria.
[6] Fernando Reyes Cortés, Cid Monjaraz, J., & Vargas Soto, E. (2013). Mecatronica Control y Automatuzación. México: Alfaomega.
[7] Mengual, P. (2010). STEP 7 Una manera facil de programar PLC de Siemens. Mexico: Marcombo.
[8] Quiroz, J. H. (Marzo 2004). Control Industrial, Hacia un concepto moderno de la Automatización Industrial. Electro Industria.
[9] Sánchez, V. A. (2001). Automatización Industrial Moderna. México: Alfaomega-Ra Ma.
[10] Tello, S. S. (2013). Sistemas Automáticos Industriales de Eventos Discretos. México: Alfaomega.

Libro digital en CD

DESARROLLO DE SOFTWARE Y HARDWARE EN MECATRÓNICA

se terminó de imprimir el día 09 de Octubre del 2015 en los talleres de: Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C. Jacobo De La Marca 223, Col. Fundadores, San Pedro Martir, CP: 76117, Querétaro, Querétaro. Se tiraron 600 ejemplares, en formato digital html, tipo CD, Tamaño: 100 Mb.

ISBN: 978-607-9394-04-2

DESARROLLO DE SOFTWARE Y HARDWARE EN MECATRÓNICA

Juan Manuel Ramos Arreguín. Doctorado en Ciencia 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. Presidente de la Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C. Profesor Titular de Tiempo Completo en la Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Informática. Pertenece al SNI del CONACYT nivel 1. Profesor perfil PRODEP. Experiencia docente: 27 años.

José Emilio Vargas Soto. Postdoctorado 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 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. Profesor Titular de Tiempo Completo. Presidente del Capítulo de Computación Inteligente IEEE-Querétaro. Senior member del IEEE. Profesor perfil PRODEP. Pertenece al SNI del CONACYT Nivel 1. Experiencia docente: 28 años.

Marco Antonio Aceves Fernández. Doctorado en Monitoreo de Sistemas Inteligentes por la Universidad de Liverpool, Inglaterra. Maestría en Sistemas Micro electrónicos por la Universidad de Liverpool. Ingeniero en Telemática por la Universidad de Colima. Profesor Titular de Tiempo Completo en la Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Informática. Miembro del Consejo Técnico de la Fundación México-Estados Unidos para la Ciencia (FUMEC) en el área de software embebido. Presidente fundador de la Asociación Mexicana de Software Embebido A.C. Pertenece al SNI del CONACYT nivel 1. Perfil PRODEP. Experiencia docente: 9 años.

Jesús Carlos Pedraza Ortega. Doctorado en Ingeniería Mecánica con especialidad en Robótica, por la Universidad de Tsukuba, en Japón. Maestría en Ingeniería Eléctrica en la Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica (FIMEE). Ingeniero Electrónico egresado del Instituto Tecnológico de Celaya. Profesor Titular de Tiempo Completo en la Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Informática. Coordinador de la Maestría y el Doctorado en Ciencias de la Computación. Representante del Cuerpo Académico en Cómputo Científico y Tecnológico. Profesor perfil PRODEP. Pertenece al SNI del CONACYT nivel 1. Experiencia docente: 17 años.

Efrén Gorrostieta Hurtado. Doctorado en Ciencia y Tecnología, con especialidad en Mecatrónica y Maestría en Ciencia y Tecnología con especialidad en Automatización y Control por el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial. Licenciatura en Ingeniería Electrónica por el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Occidente. Presidente del Capítulo de SMC-IEEE Querétaro. Profesor Titular Tiempo Completo en la Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Informática. Profesor perfil PRODEP. Senior member del IEEE. Pertenece al SNI del CONACYT nivel 1. Experiencia docente: 25 años.

ISBN: 978-607-9394-04-2