VOLÚMEN 2
NÚMERO 1
ENERO 2013

La Mecatrónica en México

Editada por:
Juan Manuel Ramos Arreguín
José Emilio Vargas Soto

ASOCIACIÓN MEXICANA DE MECATRÓNICA A.C.

ISSN XXX-XXXX

Personal de la Revista

Diseño Gráfico

Mónica Vázquez Guerrero
Kikey Stephanie Méndez Sánchez
Alejandra Miguel Vargas Mandujano

Vinculación

Luis Alberto Aguilar Bautista
Luis Antonio Salazar Licea
Miguel Ángel Bacilio Rodríguez

Revisión de Formato

Rodrigo Escobar Díaz-Guerrero
Conrado Vargas Cabrera
Alejandro de León Cuevas
Ángel Juárez Buenrostro

Soporte Técnico

Carlos Alberto Ramos Arreguín
Juan Carlos Moya Morales
Ma. Del Carmen García López
Ubaldo Geovanni Villaseñor Carrillo

© 2013 DERECHOS DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS. La Mecatrónica en México es una publicación cuatrimestral editada por la Asociación Mexicana de Mecatrónica A. C., Calle Fonología No. 116, Col. Tecnológico C.P. 76158, Querétaro Qro. Tel. (01- 442) 224 0257. www.mecamex.net/revistas/LMEM/ Editores responsables: Juan Manuel Ramos Arreguín y José Emilio Vargas Soto. La revista cuenta con el Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2012-092010534100-102, ISSN en trámite, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derechos de Autor. Las opiniones expresadas por los autores de los artículos no reflejan la postura de la Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C. Esta revista es una publicación de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la Asociación Mexicana de Mecatrónica A. C., la cual permite el uso, distribución y reproducción sin restricciones por cualquier medio, siempre y cuando los trabajos estén apropiadamente citados, respetando la autoría de las personas que realizaron los artículos.

PROLOGO

Las actividades científicas y académicas en los últimos años han permitido una creciente evolución del conocimiento como no habíamos tenido antes en la historia de la humanidad. Cada vez es más complejo realizar una búsqueda de tópicos especializados, debido principalmente a la gran cantidad de información que podemos encontrar y que no necesariamente nos será de utilidad.

Está claro que los avances en las tecnologías de la Información contribuyen a facilitar la tarea de búsqueda de información específica, selección y almacenamiento. Sin embargo, al mismo tiempo se desborda una gran cantidad de información, dificultando precisamente su clasificación y análisis.

Con el propósito de difundir y facilitar el intercambio de conocimientos vinculados con la investigación y el desarrollo de las tecnologías afines a la Ingeniería Mecatrónica surge ésta revista. El ejemplar que tienes en tus manos es un esfuerzo que realiza la Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C. para dar a conocer a la sociedad los nuevos conocimientos y avances logrados en diversos tópicos de la Ingeniería Mecatrónica. Espero que la revista contribuya en lograr la comprensión y aplicación de dichos conocimientos con el propósito de mejorar la calidad de vida en la sociedad.

Confío firmemente en que los temas expuestos en esta edición sean elementos de inspiración para innovar nuevos productos, procesos o servicios.

Disfrútalos.

Dr. José Emilio Vargas Soto
Fundador
Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.

ÍNDICE

Aplicaciones de la Lógica Borrosa al Control de un Dispositivo Robótico Didáctico de Evasión de Obstáculos y Buscador de Luz. 1
Rocha Morales Jesús Ángel, Jiménez López Eusebio, Núñez Pérez Eduardo, Reyes Ávila Luis, Luna Acosta Noé, Urbalejo Contreras Arturo, Grijalva Mireles Pedro, Madrid Amarillas Germán.

Sistema de Telemando Multiplataforma para Robot Móvil. 11
Vargas Cabrera Conrado, Ramos Arreguín Carlos Alberto, Moya Morales Juan Carlos, García López María del Carmen.

Modelado y Planificación de las Trayectorias de un Robot Limpiador. 21
Gutiérrez Arias José Eligio Moisés, Rugerio Escalona Rosa María, Morín Castillo María Montserrat.

Automatización del Proceso de Embutido Profundo/Semi-profundo. 33
Álvarez Zapata L. A., Sandoval Pineda J. M. y Flores Herrera L. A.

La Mecatrónica en México, Vol. 2, No. 1, páginas 1 – 10, Enero 2013
Disponible en línea en www.mecamex.net/revistas/LMEM
ISSN en trámite, © 2013 Derechos de autor y derechos conexos, Asociación Mexicana de Mecatrónica A. C.

Aplicaciones de la Lógica Borrosa al Control de un Dispositivo Robótico Didáctico de Evasión de Obstáculos y Buscador de Luz

Rocha Morales Jesús Ángel [1], Jiménez López Eusebio[2], Núñez Pérez Eduardo[3], Reyes Ávila Luis[4], Luna Acosta Noé[5], Urbalejo Contreras Arturo[6], Grijalva Mireles Pedro[7] y Madrid Amarillas Germán[8]

[1,3]Universidad La Salle Noroeste
[2]ULSA Noroeste - CINNTRA de la UTS – IIMM
[4]Instituto Mexicano del Transporte - IIMM
[5,6,8]CIAAM de la Universidad Tecnológica del Sur de Sonora (UTS)
[7]Moctezumaspeakers

Recibido: 15 / Diciembre / 2012. Aceptado: 14 / Enero / 2013. Publicado: 31 / Enero / 2013.

Resumen.

En este artículo se presenta el diseño, la fabricación y el control de un robot evasor de obstáculos con una implementación para seguir la luz. El control del vehículo fue hecho con una técnica de la Inteligencia Artificial llamada Lógica Difusa o Borrosa (método de Mandami). Fueron colocados 3 sensores para la evasión de obstáculos y un sensor diferencial para la guía de la luz (Infrarrojos y fotorresistencias). Fue usado el Micro-controlador: PIC18F4550 para implementar el control del robot. Los actuadores usados para el movimiento del robot son dos motorreductores. El dispositivo robótico funcionó de acuerdo con el control diseñado, por lo que se puede concluir que el método de la lógica borrosa es útil y práctico en el control de vehículos evasores de obstáculos usados para propósitos didácticos. Finalmente, los resultados obtenidos pueden ser usados para la enseñanza de la mecatrónica.

Palabras clave: Lógica Borrosa, Robótica Móvil, Educación en Ingeniería, Control.

1. Introducción.

De acuerdo con [1], la Mecatrónica es una Ingeniería que integra tres campos principales del conocimiento: la Mecánica, la Computación y la Electrónica. Para desarrollar los productos y los procesos, la Mecatrónica se auxilia de todas las tecnologías disponibles de sus tres campos primarios incorporando conocimientos de los campos secundarios, tales como las matemáticas, la manufactura, la inteligencia artificial, la robótica, entre otros [2]. La Mecatrónica es un campo de estudio relativamente nuevo. Inició formalmente a finales de los años 60 en Japón y en México tiene un poco

más de dos décadas de haberse constituido como un campo de estudio formal. El poco tiempo que lleva la Mecatrónica en nuestro país hace que las empresas y las universidades no tengan un claro panorama de los grandes beneficios que se obtienen tanto en las aplicaciones industriales como en el proceso formativo de los estudiantes. En la actualidad, cuando menos en las licenciaturas de Ingeniería Mecatrónica, no se tiene una clara metodología de cómo enseñar o cómo proponer sistemas de aprendizaje para el estudio de la Mecatrónica. Cada programa de estudio y cada universidad manejan un perfil y una didáctica propia o bien imitan otros sistemas de enseñanza de universidades nacionales o extranjeras. Por otro lado, otro campo de estudio que tiene la misma problemática es la Inteligencia Artificial (IA). De hecho, de acuerdo con [3], la IA tiene algunos problemas en la enseñanza de la Ingeniería Mecatrónica como por ejemplo: la información es un poco confusa y carece de la difusión adecuada. Una amplia porción del material didáctico disponible trata el tema más a nivel técnico que al nivel ingenieril, haciendo de la Inteligencia Artificial una herramienta que hace más caso a la forma que al fondo. Cuando éste no es el caso, el material tiende a ser elevadamente teórico, dificultando así que el estudiante aterrice dichos conocimientos. El ingeniero que desee implementar una solución donde se aplique la Inteligencia Artificial debe de ser capaz de desarrollar en la medida del problema, siguiendo una metodología que le permita hacer esto sin correr el riesgo de lograr un resultado pobre, tardado o inclusive obsoleto. Además, algunas de las principales razones por las que se dificulta el aprendizaje en estos campos del conocimiento son, por ejemplo, la poca o nula relación que el alumno encuentra entre estas materias y el campo laboral en el cual buscan desarrollarse, así como la apariencia tan abstracta con las que se presentan dichas materias en los salones de clase. Para que la Inteligencia Artificial pueda ser más difundida y aceptada por los alumnos de Ingeniería, es necesario que existan diversas aplicaciones en las que las redes neuronales, los algoritmos genéticos y la lógica difusa puedan ser vistas en la solución de problemas prácticos [4]. Los dispositivos móviles como carritos evasores de obstáculos son ampliamente usados en la didáctica para poner en práctica las aplicaciones de la IA. Por ejemplo, en [3,5] se ha aplicado la lógica borrosa para diseñar el sistema de control de dispositivos móviles y simuladores que evaden obstáculos.

Para continuar con los avances dados en [3,5] relacionados con las aplicaciones de la IA en la robótica móvil, en este artículo se presenta el desarrollo de un dispositivo robótico móvil el cual evade obstáculos mediante la colocación de sensores y al mismo tiempo sigue la mayor intensidad de luz. El control del dispositivo es diseñado aplicando lógica borrosa. El objetivo es generar aplicaciones de la AI en proyectos didácticos con la finalidad de que los alumnos se motiven y le encuentren sentido al conocimiento teórico visto en los salones de clases.

2. Marco teórico.

En esta sección se describen algunas consideraciones básicas relacionadas con la lógica borrosa o difusa.

2.1 Algunas consideraciones sobre la Lógica Difusa (Mandami).

El control por proceso difuso fue primero exitosamente logrado por Mandami (1976) con la implementación de un sistema difuso para controlar una planta de cemento. Desde entonces, el control difuso ha sido extensamente aceptado, primero en Japón y después alrededor del mundo.

Esta metodología acepta números como entradas, después traslada estos términos numéricos a términos lingüísticos (como Lento, Medio y Rápido), llamado borrosificación (fuzzification). Las reglas después asignan los términos lingüísticos de entrada a salidas similares. Finalmente los términos lingüísticos de salida son trasladados a términos numéricos, conocido como desborrosificación (defuzzification). La metodología para un control difuso según Mandami es la siguiente [6]:

Paso 1. Entradas difusas.

- Tomar las entradas y determinar el grado por el cual pertenecen a un conjunto difuso.
- La entrada es un valor numérico y el resultado es un valor de pertenencia en el conjunto lingüístico (siempre un valor en el intervalo 0 a 1).

Paso 2. Aplicar el operador difuso.

- Si existen múltiples partes en el antecedente, se aplican operadores de lógica difusa y se resuelve el antecedente a un único número entre 0 y 1. Éste será el grado de soporte para la regla.

Paso 3. Aplicar el método de implicación

- El consecuente de una regla difusa asigna todo un conjunto difuso a la salida. El conjunto difuso está representado por una función de pertenencia que es escogida para indicar las cualidades del consecuente.
- Si el antecedente sólo es parcialmente cierto, (Ej. si se asigna un valor menor que 1), entonces el conjunto lógico de salida es truncado de acuerdo al método de implicación.

Paso 4. Agregar todas las reglas

- En general, una regla por sí sola no sirve de mucho. Se necesitan dos o más reglas que puedan complementarse una con otra. La salida de cada regla es un conjunto difuso.
- Los conjuntos de salida difusos para cada regla luego son agregados en un solo conjunto difuso de salida. Finalmente el conjunto resultante será desborrosificado o resuelto en un número.

3. Metodología.

En esta sección se presenta la metodología por medio de la cual se desarrolla el robot móvil y su control. Esto es [7]:

1.- Definir funcionamiento general.
2.- Definir entradas y salidas
3.- Diseño de sensores
  3.1.- Ajustes de salida de señal a un estándar
  3.2.- Diseño del circuito de ajuste.
4.- Desarrollar lógica borrosa
5.- Construir esqueleto del programa en MATLAB
6.- Diseñar el programa para el PIC18f4550
  6.1.- Configuración del ADC y PWM
  6.2.- Adaptar el esqueleto del MATLAB para el lenguaje del PIC
  6.3.- Depurar y hacer pruebas con el dispositivo completo
7.- Diseñar el circuito del Puente H
8.- Construcción de los circuitos impresos.
9.- Fabricación del chasis y estructuras mecánicas
10.- Ensamble de los subsistemas

4. Resultados.

4.1. Desarrollo

Para que el robot móvil buscador de luz funcione, es necesario establecerlo como un sistema autónomo y definir sus partes principales, entrada, sistema de control o procesamiento, y sistema de salida o actuadores. Éste debe percibir su entorno y en base a esto tomar decisiones para así cumplir con su objetivo.

4.2. Diseño del dispositivo

Para un fácil rediseño del robot, en caso de alguna modificación, se optó por estandarizar los subsistemas que lo componen a parámetros normalizados de entradas y salidas de los mismos. De esta manera si se modifica un subsistema, esto no afecta a las demás partes de una manera significativa. La figura 1 muestra la estructura del dispositivo, donde el rectángulo representa el chasis, el semicírculo es el soporte de los sensores, los tres rectángulos rojos son los sensores de proximidad, los óvalos verdes representan el sensor de luz, y los rectángulos naranjas son los motorreductores que imparten el movimiento.

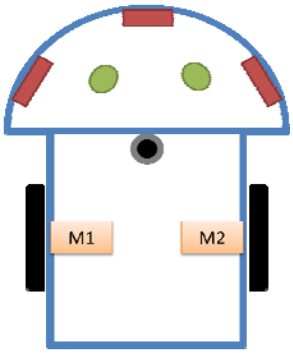

Figura 1. Estructura básica del dispositivo.

4.3 Sistema mecánico

Básicamente el sistema mecánico consta de un chasis rectangular, el cual sirve de soporte principal en la estructura del sistema, en el cual se sujetan los actuadores (motorreductores de C.D.), la batería que sirve de fuente de energía, sensores y los circuitos electrónicos para el sistema de control.

4.4 Sistema de sensores

Este dispositivo cuenta con 4 sensores, de los cuales 3 son sensores de proximidad infrarrojos y uno es un detector de luz diferencial. Los de proximidad son el GP2Y0A21YK0Fde Sharp como el mostrado en la figura 2.

Figura 2. Sensor Infrarrojo GP2Y0A21YK0F.

Para el sensor de luz se utilizó un arreglo de LDR y resistencias como se muestra en la figura 3.

Por otro lado, para determinar los valores de las resistencias, se graficaron en el software Mathematica diferentes áreas de los comportamientos de diferentes valores y arreglos, dando como resultado la gráfica mostrada en la figura 4 como la más estable. Los ejes X y Z, representan las dos LDR y el eje Y el voltaje de salida.

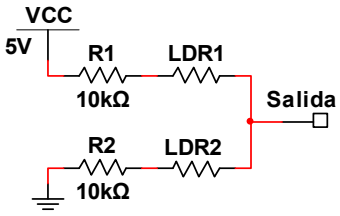

Figura 3. Circuito sensor de luz.

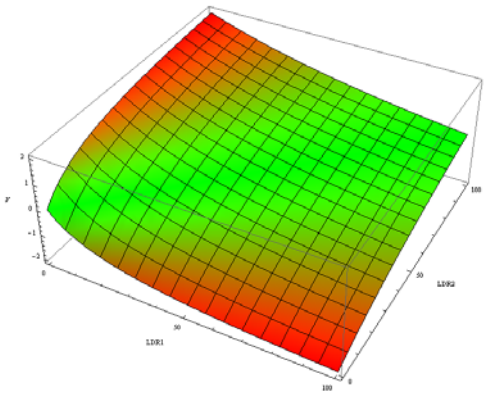

Figura 4. Gráfica de comportamiento del sensor de luz.

La función que rige comportamiento del sensor es la siguiente:

$$Vsal(LDR1, LDR2) = 5v * \frac{LDR2+10K\Omega}{LDR1+LDR2+20K\Omega} - 2.5.$$

Donde la constante -2.5 es agregada por medio de software.

4.5. Sistema de control

Éste se encarga de analizar la entrada suministrada por los sensores, procesarla y dar una salida a los actuadores. Para esto se utiliza un micro-controlador PIC18F4550 de Microchip. Este dispositivo dispone de diversas características que lo hacen versátil y de uso genérico, tales como: salidas digitales, dispositivos PWM y dispositivo ADC. La figura 5 muestra el diagrama de conexión para las entradas y salidas del dispositivo, donde se aplica la siguiente nomenclatura.

SL: Sensor de Luz.
SI: Sensor de proximidad izquierdo.
SM: Sensor de proximidad medio.
SD: Sensor de proximidad derecho.
PWM_D: PWM para el motor derecho.
PWM_I: PWM para el motor izquierdo.
DPI: Bit de dirección positiva del motor izquierdo.
DNI: Bit de dirección negativa del motor izquierdo.
DND: Bit de dirección negativa del motor derecho.
DPD: Bit de dirección positiva del motor derecho.

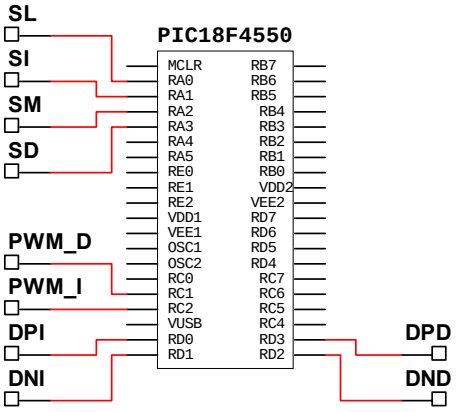

Figura 5. Conexión de entradas y salidas del PIC18F4550.

4.6 Controlador de motores.

Este sistema es el encargado de suministrar la potencia a la señales de salida del sistema de control, así como interpretar las órdenes de encendido, apagado, dirección y velocidad para los actuadores, en este caso los motorreductores de C.D. El controlador de motores es el conocido circuito tipo puente H, en este caso se utilizó un circuito integrado llamado L298, el cual trae integrado dos puentes H con suministro de corriente de hasta 2A por puente y voltaje arriba de 46V, con entradas de control compatibles con TTL de 5V (ver figura 6).

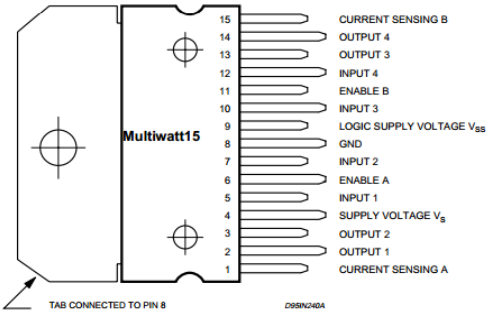

Figura 6. Integrado L298.

4.7 Actuadores.

Este sistema se encarga de dar movimiento al dispositivo robótico. Consta de dos motorreductores de corriente directa, conectados a dos ruedas posicionados opuestamente uno del otro. El sistema de giro es el llamado “sistema de giro diferencial”, el cual por medio del cambio de la velocidad y la dirección de giro de los motores determinan la trayectoria del dispositivo. (Ver figura 7), donde VL es la velocidad del motor izquierdo, VR es la velocidad del motor derecho, L es la separación efectiva entre los motores, R es el radio de giro, y ICR es el centro de rotación instantáneo.

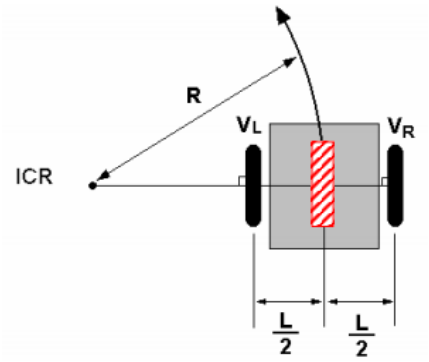

Figura 7. Sistema de giro diferencial.

4.8 Diseño del software control

El sistema de control es el encargado de recibir las señales de los sensores, procesarlas, interpretarlas y tomar una decisión en base a los resultados, y así dar una salida que posteriormente por medio de los actuadores se trasformará en un resultado físico. El software de control es el encargado del procesamiento. Para ello se utiliza un algoritmo representativo de un sistema difuso.

4.9. Diseño del sistema difuso.

El sistema difuso seleccionado dispone de cuatro entradas, un sistema basado en reglas "if-then", y dos salidas (ver figura 8).

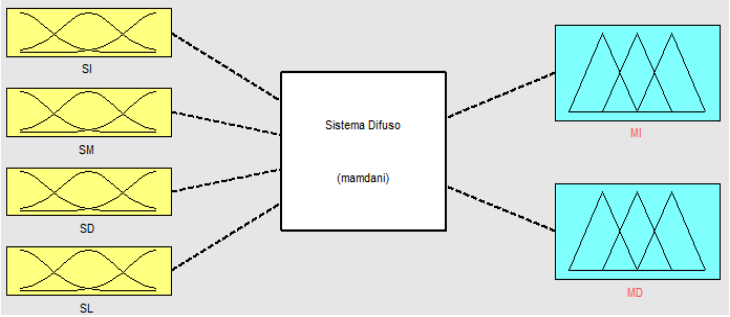

Figura 8. Sistema Difuso

En el método de Lógica Difusa Mandami, cada entrada y salida dispone de funciones de membrecía, que varían según las características de las mismas. En este caso los motores (salidas) disponen de una misma función de membrecía, los sensores de proximidad cuentan con otra función y por último el sensor de luz con otra función más. La tabla 1 muestra las características del sensor de proximidad, la figura 9 muestra la función de membrecía de los sensores infrarrojos y la figura 10 muestra la función de membrecía para el sensor de luz.

Tabla 1. Nomenclatura para la función de membrecía de los sensores.

Sensor Proximidad		Sensor Luz	
L	Lejos	M	Medio
M	Medio	I	Izquierda
C	Cerca	D	Derecha

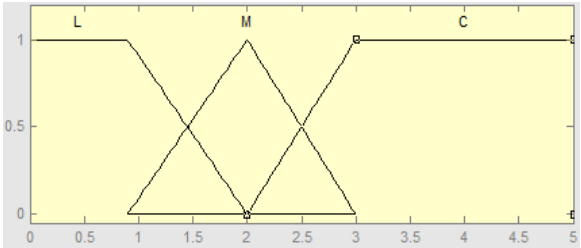

Figura 2.9. Función de membrecía de los sensores infrarrojos.

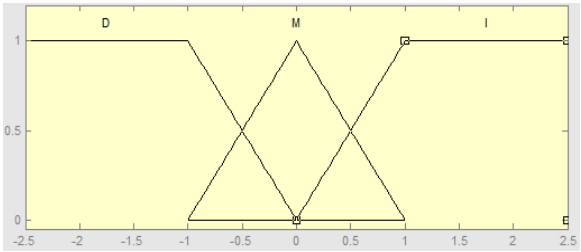

Figura 2.10. Función de membrecía para el sensor de luz.

La tabla 2 muestra las características de las salidas y la figura 11 la función de membrecía para los actuadores. Esto es:

Tabla 2. Nomenclatura para la función de membrecía de los motores.

Motores		Hexadecimal	
		MI	MD
NA	Negativo Alto	0X10	0X01
NB	Negativo Bajo	0X20	0X02
A	Apagado	0X30	0X03
PB	Positivo Bajo	0X40	0X04
PA	Positivo Alto	0X50	0X05

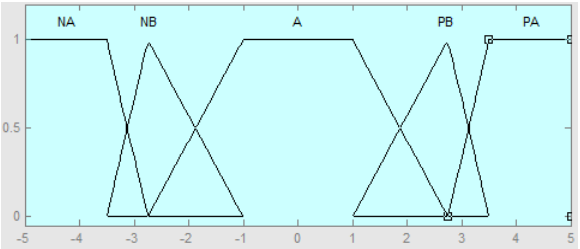

Figura 11. Función de membrecía para los motores.

Por otro lado, la base de conocimiento está formada por una serie de condiciones “If-Then”, por medio del operador “And”. Las condiciones o combinaciones se pueden ver en la tabla 3, mostrada en el apéndice A.

4.10 Diseño del algoritmo

El algoritmo, es el código del programa, el cual se encarga de encapsular la metodología del sistema difuso, así como el ajuste de las señales de entrada y de las salidas. El diagrama de flujo siguiente muestra la secuencia que sigue el programa para el micro-controlador.

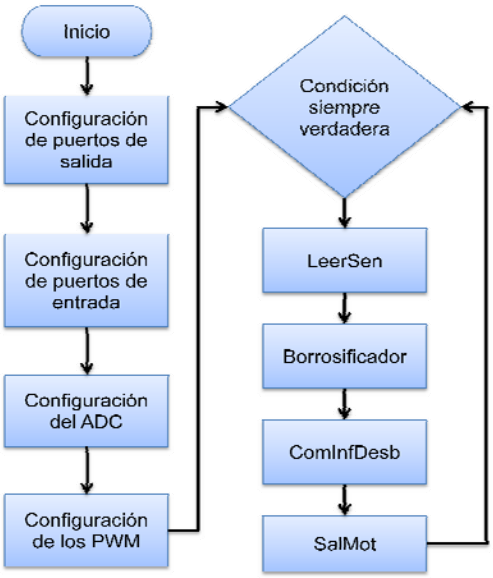

Figura 12. Diagrama de flujo del programa.

Primeramente el micro-controlador debe configurar los periféricos y establecerlos como entradas y salidas. Posteriormente debe configurar los módulos especiales, como es el ADC y el PWM. Luego, el programa entra en ciclo infinito en donde se incrustará el algoritmo que se requiere que se repita. En el ciclo se leen los sensores y se ajustan a los valores deseados. Teniendo todas las entradas leídas y ajustadas, se prosigue con la borrosificiación. El siguiente paso es hacer la composición de suma, la inferencia de producto y la desborrosificación de centroide. Por medio del centroide se obtiene la salida, pero es necesario su ajuste a PWM y dirección a cada motor. Así el algoritmo inicia nuevamente a partir de la lectura de las entradas, convirtiéndolo en un sistema autónomo de lazo cerrado. Finalmente la figura 13 muestra el dispositivo robótico construido.

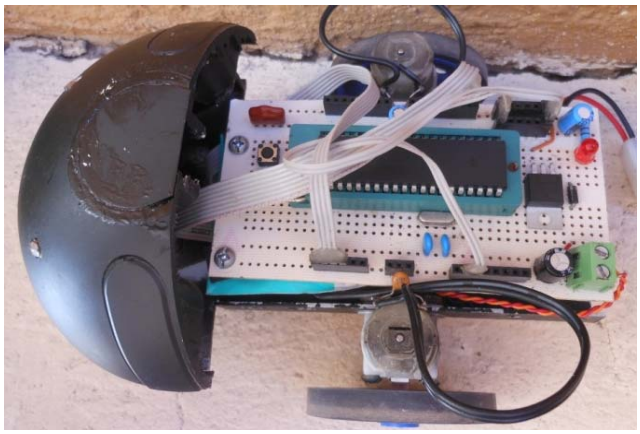

Figura 13. Configuración del robot móvil

5. Conclusiones

En este artículo se ha usado la lógica borrosa para diseñar el control de un dispositivo evasor de obstáculos. Las conclusiones derivadas de este trabajo se resumen en los puntos siguientes:

1) El dispositivo funcionó adecuadamente, esto es, evade obstáculos y sigue la mayor intensidad de luz, por lo que es posible afirmar que la lógica borrosa es útil y práctica para el diseño y control de dispositivos móviles.
2) Fue posible una buena adecuación del algoritmo de lógica borrosa al lenguaje del micro-controlador, por lo que tuvo un buen rendimiento y velocidad de reacción.
3) La versatilidad del micro-controlador utilizado, facilita la implementación de este tipo de dispositivos, así como una fácil adecuación de los algoritmos no sólo de lógica borrosa sino también de otras ramas de la inteligencia artificial.
4) La adecuación de los circuitos diseñados a los estándares TTL de 5v y baja potencia, facilita el acoplamiento de diferentes subsistemas en el producto terminado, como en el caso de los sensores y la etapa de potencia.
5) El robot puede ser usado para la motivación y la enseñanza de la Mecatrónica y de la Inteligencia Artificial.

Referencias

[1] Bishop, R. The Mechatronic Handbook. Crc Press Washington D.C. (2002)
[2] Reyes L., Jiménez E., Olvera E., Vázquez I., Mendiola E., Rivera J., López F., Delfín J., Urbalejo A. Aplicaciones del álgebra hipercompleja a la modelación y simulación de un robot paralelo planar de 3GDL tipo RRR. La Mecatrónica en México, Vol 1. No 1. Pag. 1-11. Asociación Mexicana de Mecatrónica. (2012).
[3] Madrid G., Jiménez E., Reyes L., E., Luna N. Diseño e implementación del sistema de control de un dispositivo móvil evasor de obstáculos usando lógica borrosa. 9º Congreso Nacional de Mecatrónica, Octubre 13 al 15, 2010. Puebla, Puebla. (2010).
[4] Sánchez C., Nelson E. Alanís A. Redes neuronales Conceptos fundamentales y aplicaciones a control automático, Editorial Prentice Hall. Edición Primera. Fecha publicación. Madrid, España. (2006)
[5] Madrid G., Luna N., Jiménez E., Núñez E., Orduña F. Desarrollo de un simulador para prototipo de vehículo evasor de obstáculos usando lógica borrosa. 10º Congreso Nacional de Mecatrónica, Noviembre 3 y 4, Puerto Vallarta, Jalisco. (2011).
[6] William Siler and James J. Buckley Fuzzy Expert System and Fuzzy Reasoning. WILEY-INTERSCIENCE (2005).
[7] Rocha J., Jiménez L., Núñez E., Luna N., Reyes L. Desarrollo de una metodología para el control de dispositivos móviles para propósitos didácticos usando lógica borrosa. Informe Interno de Investigación. RED ALFA-IIMM-ULSA Noroeste. ISBN en trámite. (2013).

La Mecatrónica en México, Vol. 2, No. 1, páginas 11 – 20, Enero 2013
Disponible en línea en www.mecamex.net/revistas/LMEM
ISSN en trámite © 2013 Derechos de autor y derechos conexos, Asociación Mexicana de Mecatrónica A. C.

Sistema de Telemando Multiplataforma para Robot Móvil

Vargas Cabrera Conrado, Ramos Arreguín Carlos Alberto, Moya Morales Juan Carlos y García López María del Carmen

Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Informática
Cuerpo Académico de Cómputo Científico y Tecnológico

Resumen.

El mando a distancia o Teleoperación en robots móviles inalámbricos presenta grandes inconvenientes al decidir el protocolo de comunicación con el cual serán controlados. Los principales problemas son el tiempo de respuesta, distancia de transmisión, costo, y la interferencia entre canales. La aparición de nuevas tecnologías y protocolos de comunicación, ayudan a elegir un eficaz y eficiente sistema de telecontrol. Algunos módulos más utilizados son: xBee, Bluetooth, radio control RF y Wi-Fi. El objetivo de este trabajo es desarrollar e implementar un sistema de telemando inalámbrico para controlar un robot móvil, utilizando el protocolo de comunicación OSC sobre Wi-Fi, así mismo, se interactúa con distintos dispositivos móviles y una FPGA. El sistema consta de la interfaz de control en el dispositivo móvil, el vehículo robótico, y el módulo de comunicación sobre Wi-Fi.

Palabras clave: Telemando, OSC, Wi-Fi, FPGA, iOS, Android, iPhone, iPod, iPad, Robot Móvil.

1. Introducción.

En los últimos años, las comunicaciones inalámbricas se han convertido en líder de los sistemas de envío y recepción de datos a distancia. La tecnología inalámbrica ofrece capacidades de movilidad a los usuarios, sustituyendo las limitantes de una conexión física por cable. Hoy en día, existen en el mercado innumerables dispositivos con conexiones inalámbricas basados en distintos protocolos de comunicación como lo son: Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth, GSM, etc. Debido a lo anterior, es necesario realizar una adecuada elección del protocolo, dependiendo de las necesidades de operación del usuario. El IEEE define los protocolos de comunicación entre redes de ordenadores bajo el estándar 802. Asignando a la tecnología Wi-Fi (WLAN) el protocolo 802.11 el cual opera en el rango de frecuencia de 2.4 GHz a 5 GHz. El protocolo 802.15.4 define las comunicaciones ZigBee (PAN) con frecuencia de trabajo de 900 MHz a 2.4GHz. El estándar de Red de Área Personal Inalámbrica (WPAN) define las comunicaciones inalámbricas para Bluetooth bajo el protocolo 802.15, trabaja en el rango de frecuencias 2.4 GHz a 2.48 GHz [1].

El presente artículo describe el desarrollo de aplicaciones para enviar y recibir datos, a través de los protocolos de comunicación inalámbrica Wi-Fi y ZigBee, y los servicios que ofrecen en distintos sistemas operativos, así como en hardware embebido y dispositivos móviles, implementado en el telemando de un robot móvil. Una de las ventajas al desarrollar un sistema de telemando, es que el

usuario tiene la posibilidad de elegir entre diversos dispositivos para operar el sistema, así como el protocolo de comunicación para la transferencia de datos. Actualmente existen dispositivos móviles que con recursos de hardware y software permiten comunicarse utilizando distintos protocolos de comunicación, así mismo, poseen sensores (acelerómetros, giroscopios, sensor de proximidad) disponibles para el desarrollador, basados en diferentes tecnologías. La potencia de tener un sistema operativo en teléfonos celulares y tabletas, permite adecuar controles de mando basados en interfaces gráficas, control de movimiento por medio de acelerómetros, y procesar instrucciones de control en aplicaciones nativas del dispositivo móvil.

Los sistemas operativos iOS de Apple y Android de Google presentes en teléfonos inteligentes y tabletas (Tablets), permiten la interacción del hardware presente en ellos, con sistemas embebidos y dispositivos programables como Arduino y FPGA, entre otros, por medio de comunicación Wi-Fi y Bluetooth.

En el sistema de telemando se describe las ventajas y desventajas que ofrecen los distintos protocolos en comparación a la respuesta obtenida por los microcontroladores. El tiempo de respuesta, distancia de transmisión, costo, tasa de transferencia de datos y la interferencia entre canales, son los aspectos a evaluar para elegir un eficaz y eficiente sistema de telecontrol.

1.1 Antecedentes

Wright, (2002) presenta las especificaciones del protocolo OSC (Open Sound Control), donde describe el protocolo como mecanismo de transferencia de datos, desarrollado para la comunicación entre computadoras, sintetizadores de audio y dispositivos multimedia.

Schmeder, (2008) desarrolla el protocolo uOSC, en su trabajo, describe la implementación del protocolo OSC, para un microprocesador embebido, comunicado mediante cable USB bajo el protocolo serial.

Curiel Razo, (2010) implementa una red de sensores inalámbricos de tipo Ad-hoc, utiliza el protocolo de comunicación ZigBee para la transferencia de datos. En su trabajo describe como logra implementar el monitoreo en tiempo real de la temperatura interior y exterior de un edificio.

Pérez Arreguín, (2011) desarrolla un robot móvil de tracción diferencial, donde implementa el protocolo ZigBee para comunicarse inalámbricamente al robot. Diseña una interfaz gráfica desarrollada en Visual Basic, lo que permite al usuario manipular el robot, por medio de los cursores del teclado de la computadora.

2. Metodología.

2.1 Protocolo OSC.

Open Sound Control (OSC) es un protocolo de comunicación entre computadoras, sintetizadores de sonido y dispositivos multimedia (Wright, 2002). Hoy en día el protocolo OSC se ha desarrollado como librerías, para muchos lenguajes de programación. OSC es un protocolo de alto nivel, designado en un modelo cliente/servidor. Los datos transferidos se agrupan en una unidad llamada paquete. La unidad básica de datos OSC se llama mensaje y tiene la siguiente estructura:

- **address pattern (dirección patrón).** Es una cadena OSC que comienza con el carácter "/".
- **Type tag string (tipo de cadena).** Es una cadena OSC que comienza con el carácter "," seguido de una secuencia de caracteres que corresponden al argumento del mensaje OSC. Los tipos de cadena más utilizados son: "i" que representa a un entero de 32 bit, "f" que representa a un valor flotante de 32 bits, y "s" que representa a una cadena de texto (Wright, 2002).

2.2 iOS - XCode.

iOS es el sistema operativo para dispositivos móviles de Apple. La arquitectura de este sistema operativo es similar a la de Mac OSX. iOS funciona como un intermediario entre el hardware presente en el dispositivo móvil y las aplicaciones que se observan en pantalla. La implementación de la tecnología iOS se distingue por niveles, donde el nivel más bajo contiene los servicios fundamentales para la ejecución de las aplicaciones. En el nivel más alto se implementan los servicios que interactúan con el usuario. Estos niveles consisten en un grupo de frameworks, los cuales proveen los objetos y clases necesarios para la construcción de aplicaciones nativas del sistema operativo.

2.3 Android SDK y Android Processing.

Android es el sistema operativo para dispositivos móviles de la compañía Google, está basado en el kernel de Linux.

Para la creación de aplicaciones Android se utiliza el SDK, que se ejecuta bajo la herramienta de desarrollo Eclipse, así como en la plataforma Processing. Processing es un entorno de desarrollo y al mismo tiempo es el nombre del lenguaje de programación, y está desarrollado bajo java, con lo cual es compatible para la creación de aplicaciones Android (© Google, 2012).

3. Desarrollo

El sistema consta de dos unidades principales, la interfaz de control contenida en el dispositivo móvil y la unidad del vehículo robótico, conectados por los protocolos de comunicación WiFi y zigBee. Funciona bajo el modelo cliente-servidor, donde las interfaces de control toman el papel de cliente, ya que son las que envían los datos a través de la red, y la unidad del vehículo robótico se desarrolla como servidor para procesar los datos adquiridos. Para el óptimo manejo y control del robot móvil se diseñaron diferentes interfaces, uno para cada dispositivo móvil, construido en una aplicación nativa de su sistema operativo. Teniendo así, tres distintas aplicaciones divididas de la siguiente manera: aplicación exclusiva para iPod/iPhone, aplicación para iPad y aplicación para Android.

A continuación se describe el proceso del desarrollo de cada aplicación, como también el diagrama de comunicación entre el dispositivo móvil y el robot.

3.1 Desarrollo de la aplicación para iPod.

La aplicación “OSC Control Car iPod” se desarrolla para poder ser utilizado en los siguientes dispositivos: iPod Touch 3G, iPod Touch 4G, iPhone 3GS, iPhone 4, iPhone 4S con sistema operativo iOS 5.0 o posterior. El procedimiento para desarrollar esta aplicación, se describe de la siguiente manera:

1. El primer paso en la construcción de la aplicación, consta en crear un proyecto nuevo basado en la plantilla “Single View Application”, ya que proporciona las clases y frameworks indispensables para ejecutar la aplicación en el dispositivo, así mismo, es la base para construir los objetos y clases posteriores que se requerirán dentro de la aplicación.

2. Posteriormente se importan los frameworks VVOSC2 y Accelerometer.

3. A continuación se obtiene la dirección IP y el número de puerto UDP al cual se transferirán los datos.

4. Se crea un objeto OSC. En este paso se manda a llamar al manejador del protocolo OSC, el cual carga en el objeto creado la dirección IP y el número de puerto UDP. Así mismo, se crea un objeto acelerómetro, al cual se le asigna la propiedad de leer el valor del sensor en un intervalo de 0.1 segundos.

5. Se obtienen los datos procedentes de los acelerómetros. En este paso se crea un mensaje de tipo OSC con la siguiente estructura:
   OSCMessage: accxyz
   Address: /accelerometer
   Values: float acceleration.x
   float acceleration.y
   float accelerarion.z
   donde *accelaration* corresponde a los valores de los acelerómetros en los ejes x,y,z.

6. Se inicializa la conexión Wi-Fi mediante el manejador del protocolo OSC.

7. Se envía el mensaje OSC que contiene el valor de los acelerómetros. En este paso se cicla el proceso de envío de datos, renovando los valores obtenidos por los acelerómetros.

8. El último paso es cerrar la conexión Wi-Fi cuando ya no es requerida.

La figura 1, muestra el diagrama del proceso de desarrollo de la aplicación.

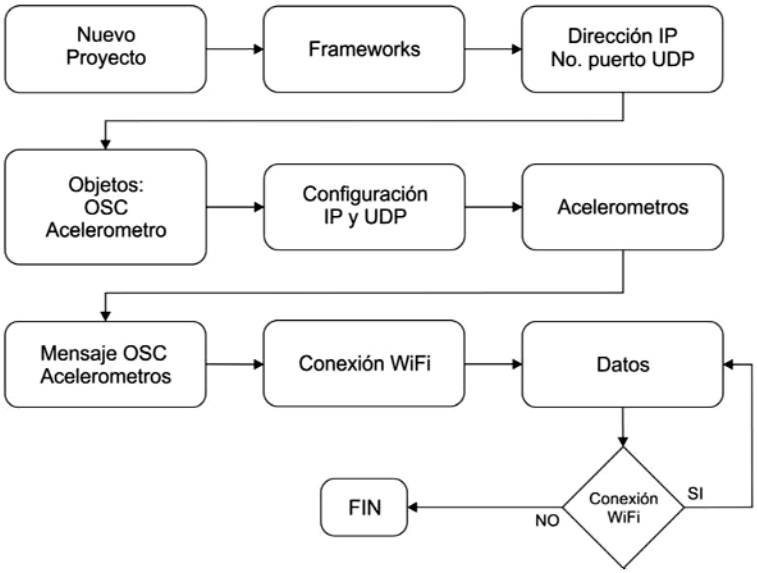

Figura 1. Diagrama de la aplicación "OSC Control Car iPod".

3.2 Desarrollo de la aplicación para iPad.

La aplicación "OSC Control Car iPad" se desarrolla para poder ser utilizado en los siguientes dispositivos: iPad, iPad2, iPad3 con sistema operativo iOS 5.0 o posterior. En el procedimiento para desarrollar la aplicación del dispositivo iPad, se utiliza la metodología que se detalla en la figura 2, más la implementación de recibir video por streaming. A continuación se describe el proceso de desarrollo para la aplicación "OSC Control Car iPad".

Siguiendo la metodología de la figura 1, se utilizan los primeros 4 pasos para el comienzo del desarrollo de la aplicación del dispositivo iPad. Posteriormente se implementan los siguientes pasos. Se obtiene la dirección URL para la recepción de video. A continuación se crea un objeto webpage, donde se asigna la dirección URL, este objeto cargará una página web dentro de una vista en la aplicación. Si no existe recepción de video, se intenta cargar nuevamente la dirección URL dentro del objeto webpage, por el contrario, si la recepción de video es exitosa, se continua con el paso 5 del procedimiento descrito, hasta concluir la metodología.

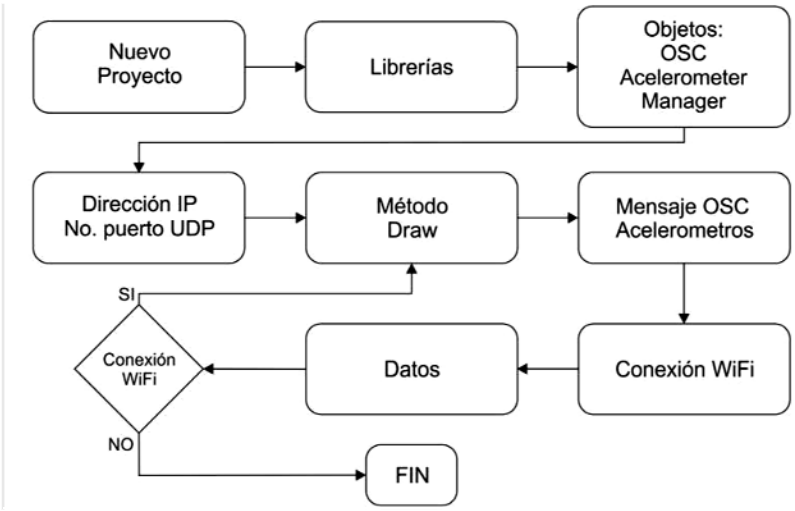

Figura 2. Diagrama del procedimiento de desarrollo para la aplicación "OSC Control Car" en el sistema operativo Android.

3.3 Desarrollo de la aplicación para Android.

La aplicación "OSC Control Car" se desarrolla para poder ser utilizado en teléfonos celulares y tabletas con sistema operativo Android 2.2 o posterior. El procedimiento para desarrollar esta aplicación se describe a continuación.

1. Primeramente se genera un nuevo proyecto Android dentro del SDK, el cual contiene los recursos necesarios para poder exportar la aplicación al dispositivo móvil. Se procede a importar las librerías OSCP53 y la clase accelerometerManajer.java

2. Se crea un objeto OSCP5, al cual se le pasarán los parámetros del protocolo OSC. Así mismo se crea un objeto acelerómetro para obtener los datos del sensor.

3. A continuación se obtiene la dirección IP y el número de puerto UDP, al cual se transferirán los datos.

4. Posteriormente se manda a llamar el método Draw. En este paso se renuevan los datos obtenidos del sensor acelerómetro. Se crea un mensaje de tipo OSC con la siguiente estructura:
   OSCMessage: accxyz
   Address: /accelerometer
   Values: float acceleration.x
   float acceleration.y
   float accelerarion.z
   donde *accelaration.x.y.z* corresponden a los valores de los acelerómetros en los ejes x,y,z.

5. Se inicializa la conexión Wi-Fi mediante el objeto OSCP5.

6. Se envía el mensaje OSC que contiene el valor de los acelerómetros. En este paso se comprueba si existe conexión por Wi-Fi, de ser positivo se devuelve al método Draw, de lo contrario se finaliza el proceso.

3.4 Programa servidor en processing para recibir datos OSC.

El programa servidor que se describe a continuación y se desarrolla en el entorno de programación Processing. Una de las ventajas de este SDK es su versatilidad de ser implementado en distintos sistemas operativos como Linux, Mac OS, Windows y Android. Por tal motivo, se decidió desarrollar el programa en Processing, con lo cual se obtiene un sistema multiplataforma. La figura 3, describe el diagrama del proceso de desarrollo para la creación del programa servidor.

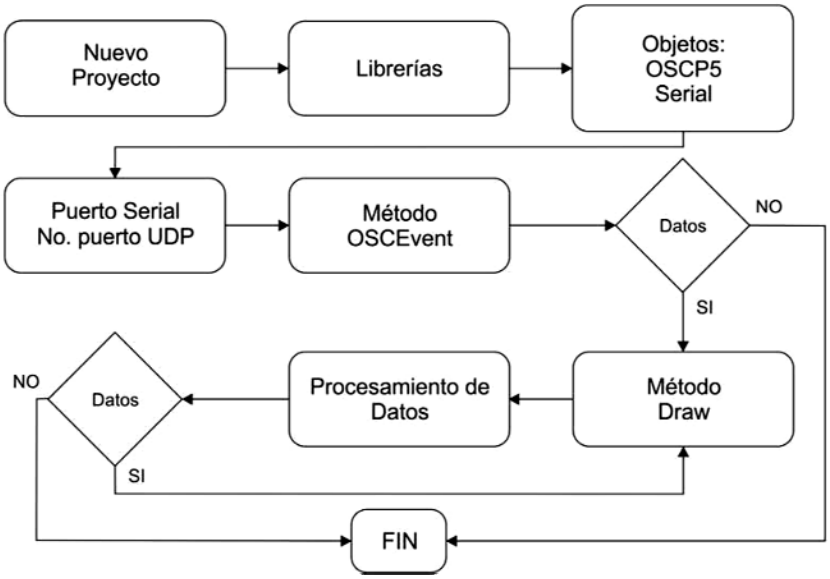

Figura 3. Diagrama de la aplicación servidor.

A continuación se describen los pasos para desarrollar el programa servidor. Se detalla el método de obtención de datos procedentes del dispositivo móvil. Así mismo, se detalla el proceso de envió de datos a través del puerto serial de la computadora hacia el robot móvil, por medio del protocolo de comunicación zigBee.

1. El primer paso es crear un nuevo sketch e importar las librerías necesarias para la ejecución de la aplicación (Serial, OSCP54). La librería processing.serial permite la lectura y escritura de datos con elementos externos de la computadora. Por otra parte la librería OSCP5, implementa los métodos necesarios para el manejo del protocolo OSC sobre Wi-Fi.

2. Se crea un objeto Serial. En este paso se identifica el puerto serial COM correspondiente al módulo xBee. Así mismo, se crea un objeto OSCP5, el cual se le asigna la propiedad de escuchar mensajes entrantes por el número de puerto UDP a establecer.

3. Posteriormente se manda a llamar al método OSCEvent, donde se reciben datos de tipo OSCMessage, procedentes del dispositivo móvil.

4. Se manda a llamar al método Draw. En este paso se renuevan los datos obtenidos con anterioridad. A continuación se procesan los datos y se envían a través del puerto serial correspondiente al módulo Xbee.

5. El último paso consiste en identificar si existen datos sin enviar, de ser positivo se retorna al método draw, de lo contrario se finaliza la conexión al puerto serie.

3.5 Robot móvil en FPGA

El Lenguaje de Descripción de Hardware de muy alta Velocidad (VHDL), es un lenguaje ampliamente empleado en numerosos sistemas digitales, por lo cual, es posible implementar un sistema digital embebido para el control de un carro móvil tele-operado a distancia de manera inalámbrica. Los dispositivos programados con este lenguaje son: GAL (Generic Array Logic), CPLD (Complex Programmable Logic Device) y FPGA (Field Programmable Gate Array), por mencionar los más importantes. La figura 4 muestra el diagrama de bloques principal del sistema para el control del carro anteriormente mencionado.

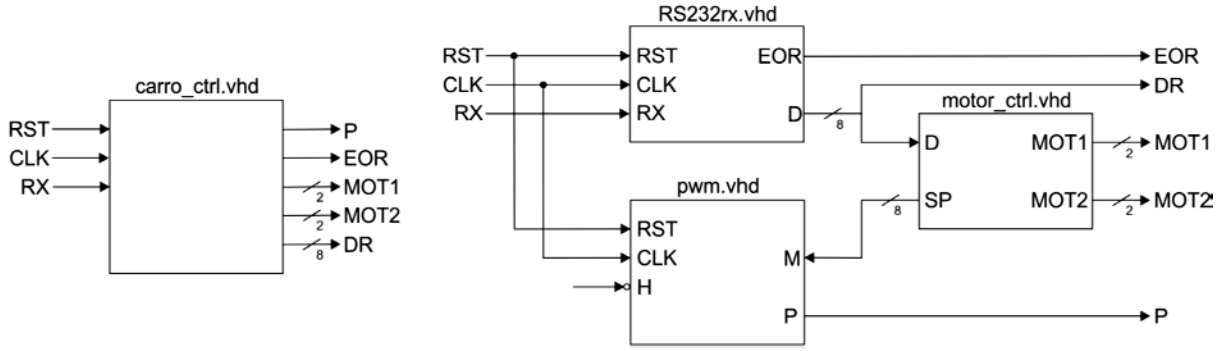

Figura 4. Diagrama General y módulos principales para el control del carro.

Las señales de entrada son un RST maestro y una señal de reloj principal, la señal RX proviene del receptor inalámbrico X-Bee, este recibe los datos para el funcionamiento de los motores del carro. La señal P es la salida de un PWM (Pulse Width Module) para controlar la velocidad de los motores cuando el carro se dirija hacia adelante, hacia atrás, vuelta a la izquierda o vuelta a la derecha. Las señales MOT1 y MOT2 controlan el sentido de giro y encendido/apagado de los motores. Por último la señal DR puede ser empleada para ver el número recibido por RX y saber que instrucción se está ejecutando. La entidad principal consta de 3 módulos principales para llevar a cabo dicho sistema de telemando, los cuáles son:

- RS232rx.vhd
- pwm.vhd
- motor_ctrl.vhd

4. Proceso de comunicación dispositivo móvil – robot móvil.

El proceso de comunicación entre el dispositivo móvil y el robot, se presenta con relativas diferencias dependiendo el dispositivo móvil a elegir. A continuación se describe el proceso para comunicar a cada uno de los sistemas.

La figura 5, muestra el detalle de comunicación entre el dispositivo móvil iPad y el robot móvil, con un sistema de retroalimentación por video streaming.

El proceso se inicia cuando el usuario ejecuta la aplicación “OSC Control Car iPad” en su iPad, en la vista principal se ingresa la dirección IP y el número de puerto UDP de la computadora servidor. En una segunda vista de la aplicación, se transmiten los datos obtenidos por los acelerómetros, a través del protocolo OSC sobre la tecnología Wi-Fi.

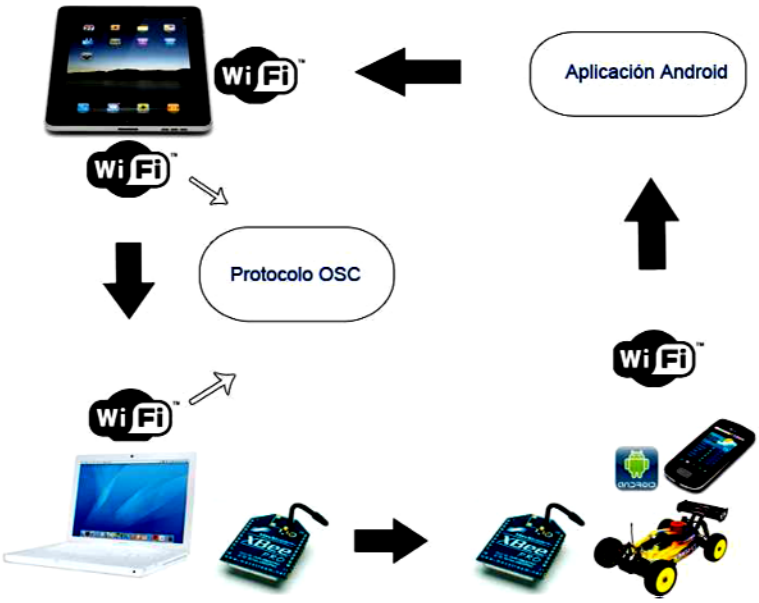

Figura 5. Diagrama del modelo de comunicación iPad – Robot móvil con retroalimentación por medio de video streaming.

La computadora ejecuta el programa servidor, el cual procesa los datos obtenidos, dentro de este programa, se implementan instrucciones de control para la manipulación del robot móvil, así mismo, se crean nuevos datos y estos son enviados a través del puerto serial correspondiente al módulo Xbee. Esta información se recibe en la tarjeta Arduino o FPGA, que contienen un programa para responder de acuerdo a los datos recibidos. El robot móvil esta equipado con un teléfono celular, el cual ejecuta la aplicación IPWebCam, que es la encargada de transmitir video por streaming a través del protocolo Wi-Fi al iPad, cerrando así el sistema de retroalimentación, dando al usuario la posibilidad de tomar nuevas decisiones en el control del robot.

5. Pruebas y Resultados

Para probar el sistema de telemando se dividió en dos partes. En el primer conjunto de pruebas, se instaló la aplicación “OSC Control Car iPod” en tres dispositivos diferentes, se hizo lo mismo para las otras dos aplicaciones. Comprobando así, el funcionamiento adecuado de las aplicaciones, al enviar los datos obtenidos por el sensor del acelerómetro. En el mismo grupo de pruebas se realizó el modelado y simulación de movimiento de un dispositivo móvil, como se puede observar en la figura 6, se dibuja una caja que se mueve en base a la información obtenida de los acelerómetros. El segundo conjunto de pruebas, se basa en analizar el tiempo de respuesta que ofrece la FPGA, con respecto al procesamiento de las instrucciones de control para manipular el robot móvil. Se observó que la tarjeta FPGA refleja resultados deseables, dando menores tiempos de retraso en el procesamiento de los datos recibidos.

Figura 6. Simulación de valores obtenidos por acelerómetros.

Así mismo, se realizaron pruebas de la distancia efectiva que ofrece el conjunto de protocolos de comunicación utilizados, y el tiempo de respuesta al enviar y recibir datos. Debido a que las pruebas se realizaron con la infraestructura de comunicación Wi-Fi que ofrece la facultad, el ancho de banda disminuye con el aumento de computadoras conectadas a la red, dando como resultado retardos en la comunicación entre dispositivos. Posteriormente se realizó una conexión de tipo Ad-hoc entre el dispositivo móvil y la computadora, lo que ofrece un ancho de banda de 100 Mbps de transferencia máxima de datos, y una distancia efectiva de 25 metros por medio del protocolo Wi-Fi. La comunicación entre módulos xBee ofrece un rango de operación de 30 metros atravesando paredes, y 100 metros en lugares abiertos.

6. Conclusiones y trabajo a futuro

En este artículo, se abordó un sistema de telemando para controlar un robot móvil. Se presenta el uso de distintas tecnologías y protocolos de comunicación como lo son Wi-Fi, ZigBee, Xbee, OSC (Open Sound Control), para el manejo y transferencia de datos por medio de comunicación inalámbrica. Se detalla la implementación de estos protocolos, en el desarrollo de aplicaciones de diversos dispositivos móviles (iPod, iPhone, iPad, teléfonos celulares con SO Android, tablet's), así como en programas, que se pueden ejecutar en diversos sistemas operativos como Windows, Linux, Mac OS, Android, iOS. Por tal motivo se consiguió desarrollar un sistema multiplataforma que se adecue a las necesidades del usuario. Se implementó el uso del protocolo OSC, como protocolo de comunicación sobre Wi-Fi, entre dispositivos móviles, computadoras y sistemas embebidos.

Se desarrolló un robot móvil de tracción diferencial, el cual ejerce el rol de sistema esclavo, de un modelo maestro/esclavo. Para la implementación de la parte de control del robot, se utilizó una FPGA. Como se observa en las pruebas realizadas, los resultados son eficientes en el sistema de telemando descrito, pero se mantiene un puente entre el dispositivo móvil, y el robot a manipular, lo cual implica un retardo en el tiempo de respuesta.

Como trabajo a futuro se implementará un sistema de telemando sobre el protocolo de comunicación inalámbrico Bluetooth, mejorando la tasa de transferencia de datos, el tiempo de respuesta entre dispositivos, desaparecer el puente existente entre el dispositivo móvil y el robot.

La principal aportación de este trabajo es el desarrollo de una aplicación para dispositivos móviles, la cual utiliza un modelo de comunicación inalámbrica para comunicarse al robot. Se utilizó el protocolo de comunicaciones OSC (Open Sound Control) sobre el protocolo de red Wi-Fi, el cual permite una tasa de transferencia de datos alta y una mayor distancia entre los dispositivos móviles y el robot. Se presentan tres alternativas diferentes: un modelo de comunicación utilizando un iPod/iPhone y el robot móvil, una segunda alternativa utilizando un iPad que es retroalimentado mediante video por streaming, y por ultimo un sistema de comunicación utilizando un teléfono celular con sistema operativo Android.

7. Referencias

[1] H. Labiod, H. Afifi y C. De Santis; Wi-FiTM, BluetoothTM, ZigBeeTM and WimaxTM; Springer; ISBN: 978-1-4020-5397-9; Dordrecht, The Netherlands 2007.
[2] R. Troncoso; Electronicá Digital y Lógica Programable; Universidad de Guanajuato, 2a Ed.; ISBN:968-8644498; Guanajuato Mexico 2007.
[3] M. Aceves, R. Arreguin; Fundamentos de Sistemas Embebidos, Mediante Lenguajes Descriptivos de Hardware; Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.; ISBN 978-607-95347-4-5; Santiago de Querétaro, Querétaro 2012.
[4] Android Developer; Sensor Type; http://developer.android.com/reference/android/hardware/Sensor.html#TYPE_ACCELEROMETER; última consulta 15/01/2012;

La Mecatrónica en México, Vol. 2, No. 1, páginas 21 – 32, Enero 2013
Disponible en línea en www.mecamex.net/revistas/LMEM
ISSN en trámite © 2013 Derechos de autor y derechos conexos, Asociación Mexicana de Mecatrónica A. C.

Modelado y Planificación de las Trayectorias de un Robot Limpiador

Gutiérrez Arias José Eligio Moisés, Rugerio Escalona Rosa María y Morín Castillo María Montserrat

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Electrónica.
jmgutierrez@ece.buap.mx, rugerio_56@hotmail.com, mmorin@ece.buap.mx

Resumen.

En este trabajo presentamos la planificación de la trayectoria de un robot limpiador como una combinación de trayectorias deseadas, el robot limpiador está provisto de dos ruedas activas y una pasiva. La deducción de las ecuaciones de movimiento no lineales son importantes pues en ellas están considerados los voltajes de los motores de las ruedas activas como elementos de control. La determinación de las trayectorias deseadas y de las ecuaciones lineales son fundamentales para la planificación de la ruta del robot limpiador. Alcanzado un punto predeterminado, mediante la obtención de imágenes con una cámara CMOS y con algoritmos de reconocimiento de color y área, el robot móvil será capaz de identificar qué tipo de objeto debe recolectar. Se describen los sensores que se implementaran para la selección y recolección de la basura.

Palabras clave: Robot móvil, control diferencial, trayectorias deseadas, sistema lineal, sensores de ultrasonido e imagen.

1. Introducción.

Con el transcurso de los años, el hombre se ha fascinado con máquinas que imiten las funciones y movimientos de los seres humanos. 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, desempeñando tareas de supervisión, exploración, distribución y transporte, entre otros, facilitando la automatización a gran escala, para esto es necesario incrementar la autonomía de estos dispositivos dotándolos con un sistema de navegación eficiente, dentro del que son relevantes tareas como lo son la percepción, planificación y control.

El estudio de la robótica móvil puede clasificar a los robots en vehículos aéreos, terrestres y acuáticos. A su vez los robots terrestres se pueden clasificar de acuerdo al tipo de locomoción que utilicen para desplazarse dentro de su espacio de trabajo en tres categorías: robots de ruedas, robots de patas y robots de orugas. A pesar del amplio estudio de la movilidad de robots por patas y de orugas, el desarrollo más significativo se ha dado en la locomoción por ruedas. [1]

Actualmente la forma más común de controlar a los robots es por medio de paneles de control con botones, perillas, etc. Sin embargo, la necesidad de tener una comunicación más directa entre el humano y el robot, está llevando al desarrollo de alternativas que incluyen visión por computador y reconocimiento de imágenes. [2]

2. Ecuaciones de movimiento del robot móvil

Los robots móviles se pueden construir basándose en diferentes diseños de plataformas, que se diferencian por los diversos sistemas de tracción que utilizan. La configuración del robot móvil que se utilizará a lo largo de este trabajo, es una plataforma con un sistema de tracción diferencial (differential steering), este sistema utiliza motores independientes para cada una de las dos ruedas activas pero situados sobre el mismo eje, además utiliza una rueda libre para proporcionar estabilidad a la plataforma.

2.1 Deducción de las ecuaciones de movimiento

El diagrama físico del robot móvil se muestra en la figura 1, el robot se encuentra dentro de un marco de referencia fijo (ξ_1, η_1) o inercial, además se aprecia un marco de referencia móvil (ξ', η') o no inercial el cual está fijado al robot y se encuentra en el eje formado por las dos ruedas activas. El punto *P*= (ξ, η) que se encuentra frente del robot móvil será el punto deseado para determinar la posición de éste dentro del marco de referencia fijo.

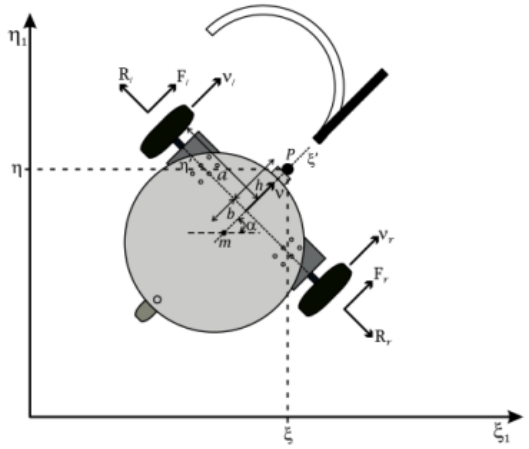

Figura 1. Diagrama físico del robot móvil.

De acuerdo al sistema de referencia no inercial propio del robot móvil podemos obtener las siguientes relaciones:

$$\vec{r_l} = \begin{pmatrix} 0 \\ a \\ 0 \end{pmatrix}; \vec{r_r} = \begin{pmatrix} 0 \\ -a \\ 0 \end{pmatrix}; \vec{v_l} = \begin{pmatrix} v_l \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \vec{v_r} = \begin{pmatrix} v_r \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \vec{v} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ 0 \end{pmatrix}; \vec{\omega} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega \end{pmatrix} \quad (1)$$

Consideramos al robot móvil como un cuerpo rígido con movimientos traslacionales y rotacionales, y que las velocidades de las ruedas activas deben tener la dirección (ξ'), se pueden calcular las velocidades de las ruedas relativas a la velocidad $\vec{v}$.

$$\vec{v}_l = \vec{v} + \vec{\omega}\, x\, \vec{r}_l = \begin{pmatrix} v_1 - a\omega \\ v_2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\vec{v}_r = \vec{v} + \vec{\omega}\ x\ \vec{r}_r = \begin{pmatrix} v_1 + a\omega \\ v_2 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{3}$$

Tomando la consideración que $\vec{v}$ (velocidad de translación del robot móvil) sólo tiene componentes en ξ' podemos obtener que $v_1 = v$ y que $v_2 = 0$; por lo tanto:

$$v_r = v + a\omega \tag{4}$$
$$v_l = v - a\omega \tag{5}$$

Para obtener v, despejamos $a\omega$ de (5) y lo sustituimos en (4)

$$v = \frac{v_r + v_l}{2} \tag{6}$$

y para obtener ω despejamos v de (5) y lo sustituimos en (4)

$$\omega = \frac{v_r - v_l}{2a} \tag{7}$$

Con las ecuaciones (6) y (7) se obtienen la velocidad angular y la velocidad del motor en función de las velocidades de los dos motores.

Si se considera que la derivada del ángulo de orientación α del robot, es la velocidad angular ω del mismo:

$$\dot{\alpha} = \omega \tag{8}$$

La posición del centro del arreglo de sensores desde el marco de referencia móvil es:

$$\xi_p = hcos(\alpha) \tag{9}$$
$$\eta_p = hsen(\alpha) \tag{10}$$

Incluyendo las componentes de la velocidad del robot (es decir, del origen del marco de referencia móvil respecto al marco de referencia fijo) tenemos

$$\dot{\xi} = vcos(\alpha) - h\omega sen(\alpha) \tag{11}$$
$$\dot{\eta} = vsen(\alpha) + h\omega cos(\alpha) \tag{12}$$

Las ecuaciones (8), (11) y (12) describen la velocidad de rotación y de translación (cinemática) respectivamente, del centro de sensores del robot móvil dentro del marco de referencia inercial (ξ_1, η_1).

Para obtener las dos ecuaciones dinámicas restantes del robot móvil, se utilizarán las ecuaciones de movimiento que plantea el Principio de DÁlembert [4] para el equilibrio dinámico de un cuerpo rígido; dichas ecuaciones son:

$$\sum F = m\bar{a} \tag{13}$$
$$\sum M = \dot{L} \tag{14}$$

en donde la ecuación (13) relaciona la resultante de las fuerzas externas y la aceleración del centro de masa del sistema y la ecuación (14) relaciona el momento resultante de las fuerzas externas y la razón de cambio de la cantidad de movimiento angular o momento angular del sistema.
Expresando la ecuación (13) para el centro de masa del robot móvil, tenemos que

$$m\frac{d}{dt}\vec{v}_0 = \vec{F}_r + \vec{F}_l + \vec{R}_r + \vec{R}_l \tag{15}$$

La derivada $\frac{d}{dt}\vec{v}_0$, representa la aceleración del centro de la masa: $\frac{d}{dt}\vec{v}_0 = \dot{\vec{v}}_0 + \dot{\vec{\omega}}\ x\ \vec{r} + \vec{\omega}\ x\ \vec{v}_0$

$$\frac{d}{dt}\vec{v}_0 = \begin{pmatrix} \dot{v} + b\omega^2 \\ -b\dot{\omega} + v\omega \\ 0 \end{pmatrix} \tag{16}$$

Ahora bien; sustituyendo la expresión (16) de aceleración del centro de masa en la ecuación de movimiento (15), se puede obtener una expresión de equilibrio dinámico para cada eje coordenado del sistema de referencia fijado en el robot como $\sum F_{\xi'} = m\dot{v}_{0\xi'}$ y $\sum F_{\eta'} = m\dot{v}_{0\eta'}$; es decir

$$m(\dot{v} + b\omega^2) = F_l + F_r \tag{17}$$
$$m(-b\dot{\omega} + v\omega) = R_l + R_r \tag{18}$$

de las cuales, la ecuación (18) no será considerada ya que sólo interesa considerar las fuerzas $F_l\ y\ F_r$ de empuje de las llantas, y no las fuerzas $R_l\ y\ R_r$ perpendiculares al plano de rotación de las llantas. También es necesario conocer la derivada del momento angular $\frac{d}{dt}\vec{L} \Rightarrow \frac{d}{dt}\vec{L} = m\left(\vec{r}\ x\ \frac{d}{dt}\vec{v}_0\right)$, ya que conocemos los vectores $\vec{r}$ y $\frac{d}{dt}\vec{v}_0$, entonces:

$$\frac{d}{dt}\vec{L} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ mb^2\dot{\omega} - mbv\omega \end{pmatrix} \tag{19}$$

Es necesario además, asociar las fuerzas $F_l\ y\ F_r$ a las coordenadas $\varphi_r\ y\ \varphi_l$ que determinan el giro de cada uno de los motores del robot móvil; para esto, se sabe que el torque o momento de un motor es:

$$\tau = F\rho \tag{20}$$

donde $\tau\ y\ F$ son el torque y la fuerza respectivamente, aplicadas por el motor; y ρ es el radio de la rueda acoplada al motor. El modelo más simple conocido para un motor de DC, es el que relaciona el torque del motor con la velocidad angular del mismo; dicho modelo se describe a continuación:

$$\tau = \chi u - \sigma\dot{\varphi} \tag{21}$$

donde τ es el torque del motor (Nm); u es el voltaje aplicado a las terminales del motor (V); $\dot{\varphi}$ es la velocidad angular (rad/s); $\chi = \frac{K_t}{R}$, donde R es la resistencia eléctrica del devanado del motor (Ω), K_t es la constante de torque (Nm/A); $\sigma = \frac{K_e K_t}{R}$, donde K_e es la constante de la fuerza contra-electromotriz del motor (Vs/rad).

Despejando la fuerza F de la ecuación (20) y sustituyendo en la ecuación resultante de esto, el valor del torque de la ecuación (21), se obtiene una expresión para calcular la fuerza del motor:

$$F = \frac{\chi u - \sigma\dot{\varphi}}{\rho} \tag{22}$$

$\dot{\varphi}_r\ y\ \dot{\varphi}_l$ son las velocidades angulares de las ruedas acopladas a los motores derecha e izquierda, respectivamente; se pueden obtener una expresión para cada una de éstas, utilizando las ecuaciones (4) y (5):

$$\dot{\varphi}_r = \frac{v_r}{\rho} = \frac{v + a\omega}{\rho} \tag{23}$$

$$\dot{\varphi}_r = \frac{v_l}{\rho} = \frac{v - a\omega}{\rho} \tag{24}$$

y así, se puede obtener con (22) y las ecuaciones anteriores (23) y (24), una expresión de fuerza para las ruedas derecha e izquierda, respectivamente:

$$F_r = \frac{\chi u_r \rho - \sigma(v + a\omega)}{p^2} \tag{25}$$

$$F_l = \frac{\chi u_l \rho - \sigma(v - a\omega)}{p^2} \tag{26}$$

Sustituyendo las expresiones (25) y (26) en las ecuaciones de movimiento (15), tenemos finalmente que:

$$m\dot{v} + mb\omega^2 = \frac{\chi}{\rho}(u_r + u_l) - \frac{2\sigma v}{\rho^2} \tag{27}$$

$$\check{J}\dot{\omega} + mbv\omega = \frac{a\chi}{\rho}(u_r - u_l) - \frac{2\sigma a^2 \omega}{\rho^2} \tag{28}$$

Por lo tanto, las ecuaciones (8), (11), (12), (27) y (28) describen el movimiento o dinámica del robot móvil:

$$\begin{aligned}
&\dot{\xi} = vcos(\alpha) - h\omega sen(\alpha)\\
&\dot{\eta} = vsen(\alpha) - h\omega cos(\alpha)\\
&\dot{\alpha} = \omega\\
&m\dot{v} = -mb\omega^2 - \tfrac{2\sigma v}{p^2} + \tfrac{\chi}{\rho}(u_r + u_l)\\
&\check{J}\dot{\omega} = mbv\omega - \tfrac{2\sigma a^2 \omega}{\rho^2} + \tfrac{a\chi}{\rho}(u_r - u_l)
\end{aligned} \tag{29}$$

Con este sistema de ecuaciones se puede realizar un análisis de estabilidad correspondiente a un sistema en lazo abierto.

3. Ecuaciones lineales y trayectorias deseadas

Con los posibles movimientos básicos que un robot móvil puede realizar en un plano como se observa en la figura 2, se pueden plantear algunas trayectorias deseadas para ser descritas por éste.

Considerando que el robot presenta movimientos horizontales y verticales paralelos a los ejes ξ_1 y η_1 tenemos en la tabla 1, las siguientes trayectorias rectas deseadas.

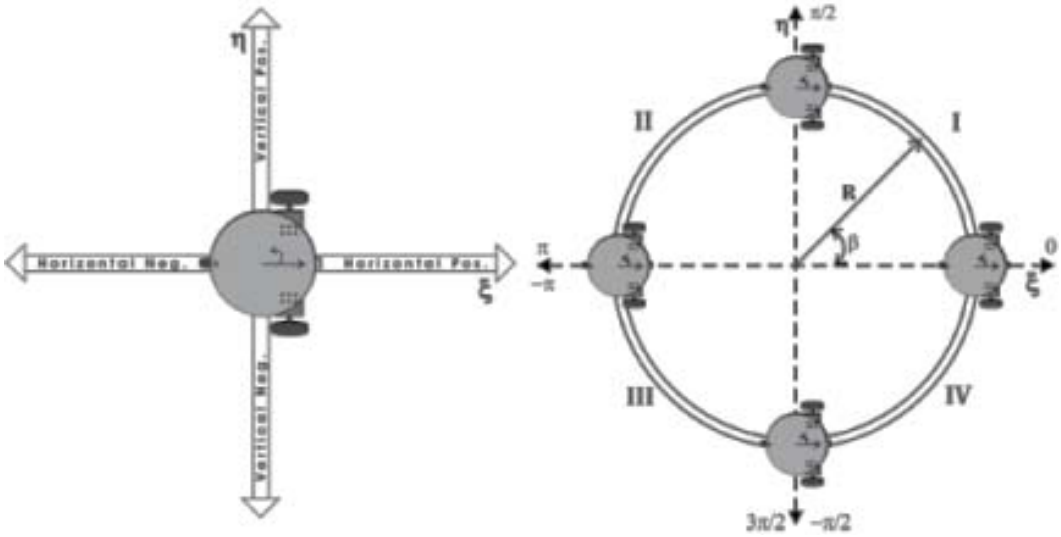

Figura 2. Trayectorias deseadas (rectas y circulares) del robot móvil.

Tabla 1. Trayectorias deseadas horizontales y verticales.

Trayectoria	ξ^d	η^d	α^d	v^d	ω^d
1. Línea Horizontal sentido positivo	$\xi_0 + v_0 t$	0	0	v_0	0
2. Línea Horizontal sentido negativo	$\xi_0 + v_0 t$	0	π	v_0	0
3. Línea Vertical sentido positivo	0	$\eta_0 + v_0 t$	$\frac{\pi}{2}$	v_0	0
4. Línea Vertical sentido negativo	0	$\eta_0 + v_0 t$	$-\frac{\pi}{2}$	v_0	0

Para obtener los desplazamientos circulares se supondrá que el estado inicial o posición de casa del robot es paralelo al eje ξ_1 y que el movimiento se describe sobre un circulo de radio R, el cuál está seccionado en cuatro cuadrantes (ver figura 2) y tomando en cuenta el sentido en que se recorre, algunas trayectorias se muestran en el tabla 2.

Tabla 2. Trayectorias deseadas circulares

Trayectoria	ξ^d	η^d	$\beta\epsilon$	α^d	v^d	ω^d
5.Cuadrante I (dirección reloj)	$Rcos\beta$	$Rsen\beta$	$\left[\frac{\pi}{2}, 0\right]$	$-\omega_0 t$	$\omega_0 R$	$-\omega_0$
6.Cuadrante I (contra reloj)	$Rcos\beta$	$Rsen\beta$	$\left[0, \frac{\pi}{2}\right]$	$\omega_0 t + \frac{\pi}{2}$	$\omega_0 R$	ω_0
7.Cuadrante II (dirección reloj)	$Rcos\beta$	$Rsen\beta$	$\left[\pi, \frac{\pi}{2}\right]$	$-\omega_0 t + \frac{\pi}{2}$	$\omega_0 R$	$-\omega_0$
8. Cuadrante IV (dirección reloj)	$Rcos\beta$	$Rsen\beta$	$\left[0, \frac{-\pi}{2}\right]$	$\omega_0 t - \frac{\pi}{2}$	$\omega_0 R$	$-\omega_0$

Siendo (30) el conjunto de ecuaciones de movimiento del robot móvil, se pueden aproximar linealmente a vecindades cercanas para las trayectorias deseadas. Así, con la trayectoria deseada:

$$y^d = \begin{pmatrix} \xi^d \\ \eta^d \\ \alpha^d \\ v^d \\ \omega^d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \xi_0 + v_o t \\ 0 \\ 0 \\ v_0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{30}$$

correspondiente a un movimiento recto horizontal en sentido positivo, se tienen las ecuaciones lineales:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\xi}} &= \tilde{v} \\ \dot{\tilde{\eta}} &= v_0 \tilde{\alpha} + h\tilde{\omega} \\ \dot{\tilde{\alpha}} &= \tilde{\omega} \\ \dot{\tilde{v}} &= -\frac{2\sigma}{mp^2}\tilde{v} + \frac{\chi}{m\rho}(u_r + u_l) \\ \dot{\tilde{\omega}} &= \frac{mbv_0}{j}\tilde{\omega} - \frac{2\sigma a^2}{j\rho^2}\tilde{\omega} + \frac{a\chi}{j\rho}(u_r - u_l) \end{aligned} \tag{31}$$

De igual forma, se pueden obtener expresiones lineales para las trayectorias deseadas restantes.

4. Planificación de las trayectorias del robot móvil limpiador

La trayectoria completa del robot limpiador será una combinación de trayectorias en línea recta y trayectorias en semicírculos como se observa en la figura 3, después de realizar dichas trayectorias el robot se detendrá y mediante la obtención de una imagen de los objetos que se encuentren frente a él, el robot se encargara de la identificación de cada objeto.

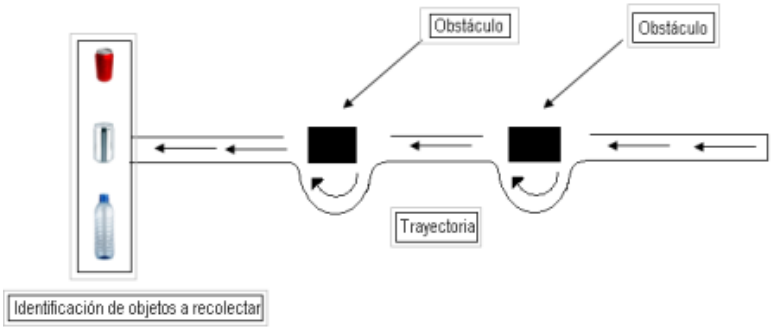

Figura 3. Trayectoria del robot móvil.

La primer trayectoria a realizar consiste en una línea recta, que después de una determinada distancia cambie de control para realizar un pequeño semicírculo y vuelva a cambiar de control para hacer un medio circulo, para esquivar el primer obstáculo, y luego repetir las mismas trayectorias para esquivar el segundo obstáculo y al final realizar un trayectoria en línea recta hasta encontrar los objetos a identificar.

Tabla 3. Valor de los parámetros del robot móvil

Variable	Valor	Descripción
h	0.25	Distancia del eje de las ruedas al arreglo de sensores [m]
m	3.00	Masa del robot móvil [kg]
b	0.047	Distancia del centro de masa al eje de las ruedas [m].
r	0.05	Radio de las ruedas activas
σ	0.00196	Fuerza contra-electromotriz del motor
T	0.135	Distancia medida entre las dos ruedas [m]
$\check{J}$	0.005	Momento de inercia [Kg]
χ	0.0041	Fricción Viscosa
v_0	0.5	Velocidad deseada [m/s]
ω_0	0	Velocidad angular deseada [rad/s]

4.1 Diseño de control para la línea recta

Se considera el sistema dinámico lineal en tiempo continuo descrito por:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \tag{32}$$

Éste modelo permite tomar en cuenta las variaciones paramétricas de un sistema dinámico.

Aplicando la programación dinámica mediante la ecuación de Hamilton- Jacobi-Bellamn se tiene que este control es:

$$u(t) = -kx(t) \quad k = R^{-1}(t)B^T(t)P(t) \tag{33}$$

además P(t) ≥ 0 es la solución de la ecuación Diferencial Matricial de Riccati:

$$-\frac{\partial P(t)}{\partial t} = Q(t) - P(t)B(t)R^{-1}(t)B^T(t)P(t) + P(t)A(t) + A^T(t)P(t) \tag{34}$$

Si $P(t)$ es reemplazada por $\bar{P}(t)$; la solución $\bar{P}(t)$ es llamada una solución estacionaria de la ecuación de Riccati (34) con condición $\bar{P}(\infty) = 0$.

La ecuación diferencial matricial de Riccati se convierte en una ecuación algebraica matricial, ya que el lado izquierdo es idéntico a cero. Por lo que el control óptimo para un sistema lineal invariante en el tiempo es :

$$u(t) = -Kx(t) \qquad K = R^{-1}B^T\bar{P} \tag{35}$$

4.1.1 Simulación para una línea recta

El algoritmo fue implementado en el software MATLAB, se utiliza la instrucción *care* para obtener solución de estabilización $\bar{P}$ de la ecuación algebraica de Riccati, y la instrucción *ode45* para la solución de la ecuación de control en lazo cerrado mediante una integración numérica por el método Runge-Kutta de 5°orden.

Así entonces, el control óptimo para que el robot móvil realice la trayectoria recta deseada está dado por:

$$U = [\,97.8324 \quad 28.6652 \quad 7.3371 \quad 48.9040 \quad 2.0316]$$
$$[97.8324 \quad -28.6652 \quad -7.3371 \quad 48.9040 \quad -2.0316]$$

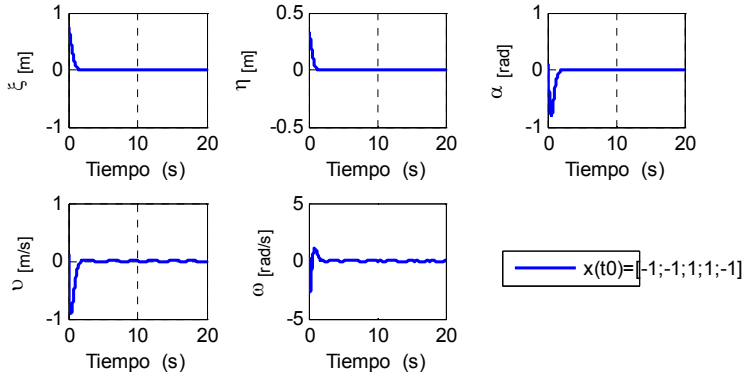

Figura 4. Trayectoria recta horizontal con sentido positivo.

4.2 Diseño de control para un semicírculo

Un sistema lineal con parámetros variantes, depende explícitamente de un vector de parámetros variante en el tiempo θ(t) que puede medirse en tiempo real, éste parámetro es descrito para todo t ≥ 0 por la ecuación:

$$\dot{x}(t) = A\big(\theta(t)\big)x(t) + B\big(\theta(t)\big)u(t) \tag{36}$$

Un sistema lineal con parámetros variables puede interpretarse como una generalización de un sistema lineal invariante en el tiempo cuando la trayectoria paramétrica admisible es constante $\theta(t) = \theta_0$.

Una sola solución óptima para todos los sistemas lineales invariantes en el tiempo se realizará, haciendo la transformación de la ecuación algebraica de Riccati modificada en una LMI[1] .
La solución de la ecuación algebraica de Riccati, es semejante a la solución de la LMI asociada a ésta la cual se obtiene haciendo:

$$mín\ tr(\bar{P})\ \ sujeto\ a \begin{pmatrix} \bar{P}\check{A} + \check{A}^T\bar{P} & \bar{P}B_i \\ B^T, \bar{P} & -R \end{pmatrix} < 0 \tag{37}$$

El método que se está planteando para la obtención de un control óptimo para el sistema lineal variante en el tiempo, correspondiente una trayectoria circular en el IV cuadrante en sentido contrario del reloj, la solución de estabilización $\bar{P}$ se calcula ahora mediante la solución de una LMI para un sistema politópico.

[1] Una LMI (Desigualdades Lineales Matriciales) define un problema convexo sobre la variable, el cual se puede resolver numéricamente con la garantía de encontrar una solución, si existe alguna.

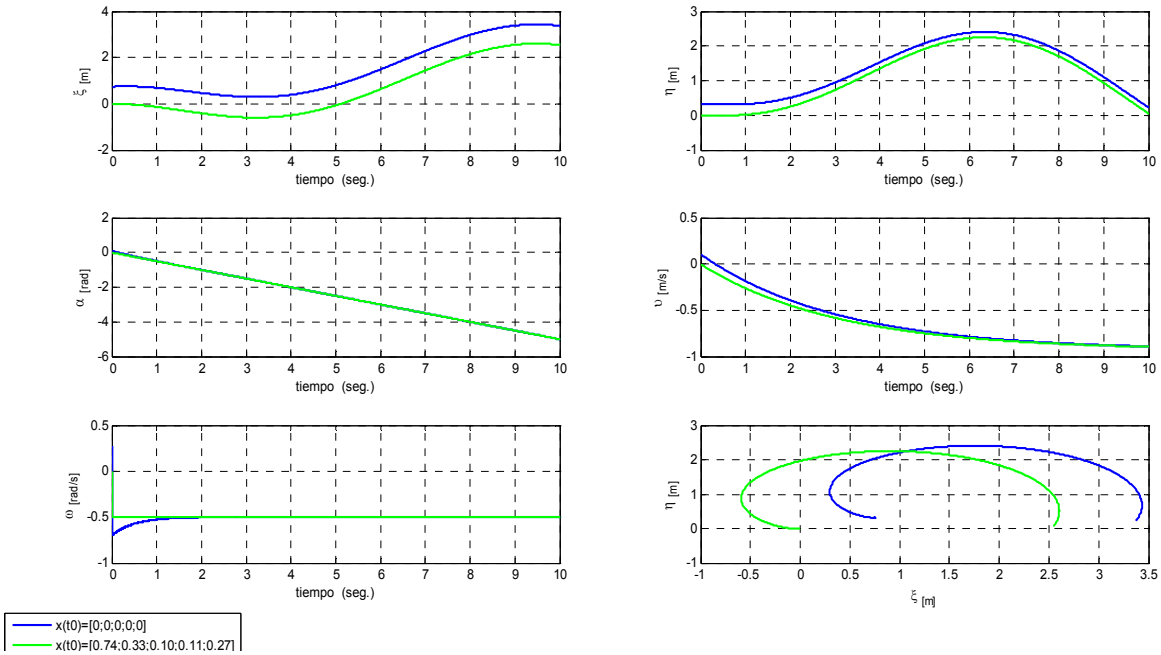

Figura 5. Trayectoria circular en el cuadrante IV con sentido contrario del reloj

5. Sensores que integran el robot móvil

Los sensores permiten la adquisición de la información necesaria para el control del robot móvil. En el estudio de los sensores debe involucrarse la medida de las magnitudes y su representación en forma compatible para su procesamiento. [5]

5.1 Sensor de ultrasonido

Los sensores de detección de objetos son una componente fundamental de los sistemas de control y guiado de vehículos.

Después de realizar una investigación de los diferentes tipos de sensores ultrasónicos existentes, se optó por elegir el sensor de ultrasonido SFR05 que está diseñado para aumentar la flexibilidad, el rango de medida y reducir costes, el rango de medida se aumenta de 3 a 4m.

Figura 6. Sensor de distancia SRF05 y diagrama de conexión.

El SRF05 (ver figura 6), es un sensor de distancias por ultrasonidos desarrollado por la firma DEVANTECH Ltda. Capaz de detectar objetos y calcular la distancia a la que se encuentra en un rango de 1,7 a 431 cm. El sensor funciona por ultrasonidos y contiene toda la electrónica encargada de hacer la medición.

5.2 Sensores digitales de imágenes

Una vez detectado el objeto a analizar con la ayuda de una cámara CMOS se llevara a cabo la captura de la imagen. La visión artificial consiste en la aplicación de técnicas de procesado de imagen y datos para extraer información de las imágenes.

Una vez que la imagen se encuentre en condiciones de ser procesada, se tiene que hallar el objeto dentro de la imagen de forma independiente, lo cual se realiza a través de la segmentación.

Cuando la imagen se encuentra segmentada, se procede a extraer las características para el reconocimiento, para que pueda clasificarse el objeto por color, tamaño o forma, mediante algoritmos de reconocimiento de color y de área. Las primeras pruebas a realizar para la identificación de color se harán con el algoritmo K-means Cluster con la ayuda de MATLAB, de la misma manera se ocupara como primera prueba para determinar el área del objeto detectado un código de cadena, después de la realizar las pruebas se pretende implementar los algoritmos en un microcontrolador PIC18F4550.

5.3 Actuadores

En el campo robótica hay diferentes tipos de actuadores que pueden ser utilizados, de los cuales los más predominantes son los motores eléctricos y los actuadores neumáticos con válvulas. Desde el punto de vista de los robots móviles, el tipo de actuador más utilizado para éste tipo de aplicación es el motor eléctrico de corriente continua (DC).
De los motores eléctricos más utilizados se puede mencionar al motor de DC estándar, el motor a pasos y los servos. [5]

Para el movimiento de las ruedas activas se cuenta con dos motores modelo EMG30. Estos motores trabajan a un voltaje máximo de 12V, poseen una caja de engranes con un radio de reducción de 30:1 permitiendo un torque de 1,5Kg/cm y una velocidad sin carga de 170rpm, además cuenta con un encoder de cuadratura que ofrece 90 pulsos por revolución del eje final.

Después de que el robot haya identificado cada objeto, se pretende que con la ayuda de un brazo robótico, el robot sea capaz de agarrar con una tenaza el objeto y colocarlo en el contenedor adecuado.

El robot estará gobernado por un microcontrolador (PIC18f4550), el cual se encarga de gobernar motores y sensores.

6. Conclusiones

Se ha realizado la deducción del modelo dinámico no lineal y mediante un análisis del mismo se han seleccionado los motores para las dos ruedas activas. Una descripción de las trayectorias deseadas se proporciona, posteriormente los sistemas lineales en las desviaciones se obtienen. Dada una tarea específica, la planificación de trayectorias deseadas se realizó con la finalidad de ejecutar dicha tarea. Actualmente se están realizando pruebas con el robot móvil. Paralelamente estamos analizando la implementación de los sensores y del brazo robótico que recogerá los objetos, cada parte que integra al robot limpiador será probado por separado para después implementar todo el sistema.

Referencias

[1] Ramos E, Morales R, Silva R. *"Modelado, simulación y construcción de un robot móvil de ruedas tipo diferencial"*, *CIDETEC-IPN, Departamento de Posgrado, Área de Mecatrónica*, J. Phys. Educ. Vol. 4, No. 3, Septiembre 2010, pág. 762.

[2] Castiblanco D, Barreto C. *"Modelado Cinemático Aplicado al Sistema de Navegación de un Robot Móvil tipo Skid Steer",* Ingeniería Mecatrónica, Universidad de San Buenaventura, 2006.

[3] F. Beer, R. Johnston, W. Clausen, Mecánica Vectorial para Ingenieros: Dinámica, McGraw Hill, 8° Ed., 2007.

[4] Riley F, Leroy D. *"Dinámica"*, Editorial Reverté, S.A., 2005, pág. 254.

[5] T. Bräunl, Embedded Robotics, Springer, 2° Ed., 2006.

La Mecatrónica en México, Vol. 2, No. 1, páginas 33 – 44, Enero 2013
Disponible en línea en www.mecamex.net/revistas/LMEM
ISSN en trámite © 2013 Derechos de autor y derechos conexos, Asociación Mexicana de Mecatrónica A. C.

Automatización del Proceso de Embutido Profundo/Semi-profundo

Álvarez Zapata L. A., Sandoval Pineda J. M. y Flores Herrera L. A.

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, ESIME-UA-IPN. Av. de las Granjas No. 682 Col. Sta. Catarina Delegación Azcapotzalco-México D.F. Tel.: 5729-6000, Ext.: 64530.
lalvarezz0800@ipn.mx

Resumen.

Se diseña una máquina alimentadora de cospeles, la cual satisface la necesidad de automatizar el proceso de embutido a un bajo costo. La máquina se encarga de seleccionar y dosificar la materia prima –cospeles– en una prensa o troqueladora que puede ser de diversas capacidades. La máquina alimentadora se elabora partiendo de la necesidad por obtener un incremento en la producción de sellos de monoblock para automóviles, mejorar la calidad de los productos finales y proteger la integridad física de los operadores de troqueladora. Con el apoyo de software de diseño y simulación, el costo final de la máquina alimentadora automática de cospeles se reduce de manera significativa, muy por debajo de los costos actuales de máquinas que desarrollan una función similar, lo cual la hace muy atractiva para el sector de las Pymes que se encargan de la producción de piezas embutidas y no cuentan con altos recursos de capital para obtener equipo de alto costo monetario que les permita hacer más eficientes sus procesos de producción.

Palabras clave: automatización, vibrador electromagnético, selección de piezas, aumento de producción, sistema de control, seguridad.

1. Introducción.

La industria manufacturera metal-mecánica en general, se encuentra en constante evolución e innovación debido a la gran demanda actual de productos y a su continuo crecimiento. Los procesos de manufactura sufren radicales cambios en cuanto a su manera de fabricar productos. Hace algunas décadas la intervención de la mano del hombre para la fabricación de piezas era fundamental, actualmente sólo se requiere de un par de operadores y varias máquinas para elaborar un sinfín de productos [1]. Estos procesos que cuentan con un alto grado de automatización, permiten obtener productos de mejor calidad a menor costo y ofrecen mayor seguridad a los operadores.

De los procesos de manufactura, el proceso de embutido o embutido profundo/semiprofundo, es uno de los que mayores riesgos presentan para el operador, debido a que se necesita operar la materia prima de forma manual y colocarla en una máquina llamada prensa o troqueladora.

2. Antecedentes generales y mercado actual.

Actualmente existe maquinaria con el herramental adecuado para llevar a cabo el proceso de troquelado, mediante la integración de elementos como dados progresivos, actuadores neumáticos, el uso de P.L.C. y sensores eléctricos entre otros, el proceso se lleva a cabo de forma autónoma y garantizando la calidad del producto, la desventaja es el costo, que es en promedio de $65 mil dólares, lo cual hace que este fuera del alcance de las Pymes dedicadas al proceso de troquelado. De esta forma surge la inminente necesidad de automatizar este proceso, el cual debe ser costeable para la Pymes, eficiente y seguro.

Otro factor importante en este proceso de manufactura, es que durante una jornada laboral de 8 horas, un operador de troqueladora puede llegar a colocar hasta 10,000 piezas, de las cuales un porcentaje aproximado del 17% son colocadas de forma incorrecta en la matriz del troquel, esto debido en gran medida a que es una tarea inmensamente repetitiva. Estas piezas colocadas erróneamente tienden a causar degeneración en el herramental y un producto con calidad inferior.

3. Necesidades.

Automatizar el proceso de embutido profundo, enfocándose en el sector de las pequeñas y medianas empresas del área metal-mecánica.

4. Objetivo de diseño.

Se diseña una máquina que selecciona correctamente la materia prima y posiciona de forma automática los cortes de lámina de cualquier geometría, de espesor no mayor a calibre catorce. La máquina es utilizada para el proceso de embutido profundo/semiprofundo.

Para facilitar el diseño de la máquina alimentadora, el objetivo de diseño se ha desglosado en seis objetivos particulares, los cuales se enfocan específicamente en satisfacer cada necesidad requerida de forma individual, y al final obtener un diseño funcional. Los objetivos particulares son:

1. Lograr un aumento en la producción de piezas embutidas y reducir costos de operación.
2. Mejorar la calidad de los productos elaborados.
3. Disminuir accidentes relacionados con la operación del proceso de troquelado.
4. Obtener un control confiable de la producción llevada a cabo por cada máquina durante el proceso.
5. Desarrollo de una interface máquina-ordenador, la cual posea un entorno gráfico amable, y sea de fácil interpretación para el operador, el inspector de calidad y supervisores de producción.
6. Fácil funcionamiento y mantenimiento.

5. Diseño del Alimentador.

Partiendo de un estudio completo de los procesos de producción actuales y otros desarrollados con anterioridad, se elabora un diseño en 3D, del cual posteriormente se analizará y simulará usando software computacional y de esta manera obtener los resultados óptimos con el mínimo de errores, evitando gastos extras ocasionados por una reingeniería en la manufactura del producto final. El diseño del alimentador consta de las siguientes etapas:

1. Preparación de la materia prima.
2. Ordenamiento y selección de materia prima.
3. Alimentación y dosificación de materia prima.
4. Colocación de materia prima en matriz de troquel.
5. Etapa de control del sistema y adquisición de datos.

5.1. Preparación de la materia prima

Uno de los pasos más importantes antes de realizar cualquier proceso, es el recibo e inspección de materia prima. En este caso para realizar los sellos de monoblock, se usa lámina de diversos materiales como, acero inoxidable T-304 y T-401, latón SAE 70-A, acero SAE 1010 y 1045, acero aluminizado, etc., las cuales se trabajan en diversos calibres (del 22 al 14). La materia prima deberá estar libre de defectos como ralladuras y abolladuras, además el espesor tendrá que ser lo más homogéneo posible en todo lo largo de la lámina, esto se realiza mediante inspecciones visuales e inspecciones de metrología dimensional –con el apoyo de micrómetro y vernier–, se acepta o rechaza la materia prima. Cualquier imperfección en la lámina se verá reflejada en el producto final.

Una vez realizada la aceptación de la materia prima, ésta es llevada a un proceso de corte, haciendo uso de la máquina cizalladora la lámina es cortada en tiras, estas tiras de lámina cuentan con el ancho correspondiente de cada cospel a fabricar. Efectuando los cálculos correspondientes se determina el ancho de la lámina, en este caso para el diseño y uso del alimentador las dimensiones con las que se trabajan son con anchuras no mayores de 100 mm y no menores a 25 mm. Ya con las tiras de lámina cortadas, están pasan a otro proceso, el cual consiste en troquelar las tiras con un punzón de corte, con el cual se obtendrán los futuros cospeles a embutir, de la misma forma, estos dados o punzones de corte cuentan con las medidas correspondientes de cada tapón a fabricar. Los dados de corte, al igual que los de embutido, deben de contar con el proceso de templado correspondiente, conforme al producto que van a fabricar, para así operar durante largos ciclos sin dañarse. Un dado de corte mal maquinado-conformado, en un corto o mediano plazo generará una orilla con filo pronunciado en los cospeles obtenidos, a lo que comúnmente se le llama rebaba. En la Figura 1 se observa un cospel obtenido de una lámina de acero inoxidable T-304, en la cual se observa en el contorno del mismo, la rebaba generada en el proceso de corte, en donde el dado de corte no cuenta con las propiedades de corte apropiadas, tales como el filo de corte entre otras. Por otra parte en la Figura 2 se ilustra un cospel obtenido de una lámina de acero SAE 1010, en donde se aprecia un borde sin imperfecciones. Los cospeles obtenidos se convertirán en la materia prima del proceso de embutido, en el cual se obtendrán los sellos o tapones con la profundidad deseada.

Dicha información refleja las fuerzas que son generadas por los músculos y la temporización de los comandos motores. Además, se usa en el diagnóstico de patologías que afectan al Sistema Nervioso Periférico, las alteraciones funcionales de las raíces nerviosas, de los plexos y los troncos nerviosos periféricos, así como de patologías del músculo y de la unión neuromuscular. La amplitud de las señales EMG varía desde los microvolts (μV) hasta un bajo rango de milivolts (mV) (menor de 10mV).

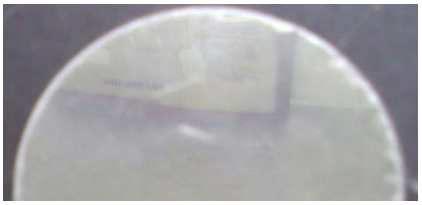

Figura 1. Cospel de acero inoxidable con filo o rebaba en su perímetro.

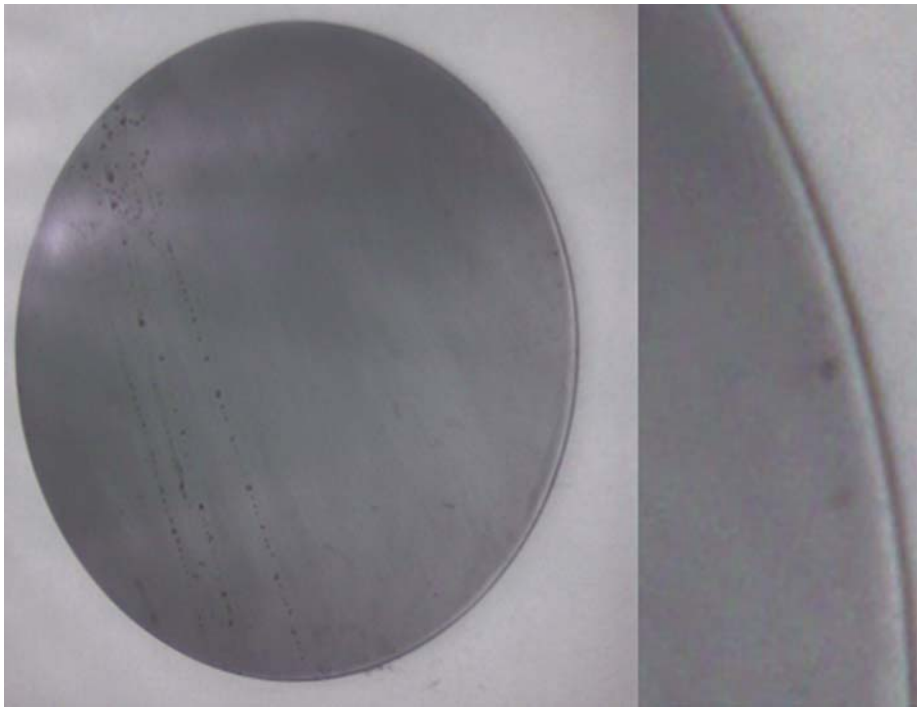

Figura 2. Cospel de acero SAE 1010 sin bordes imperfectos.

5.2 Ordenamiento y selección de la materia prima.

A partir de esta etapa en adelante se comienza con el diseño del alimentador automático. Para iniciar con el diseño, se analizan las piezas que se deben seleccionar y desplazar. Estudiando diversos sistemas de selección de piezas para ensamble existentes, se adecua uno para esta aplicación. Para ello en la Figura 3 se ilustran algunos sistemas de selección [2]. Esta etapa es una mayor importancia, ya que se realiza la selección, acomodo y alimentación de cospeles al resto de la máquina, así como también es la etapa donde se controla la detención y avance de cospeles.

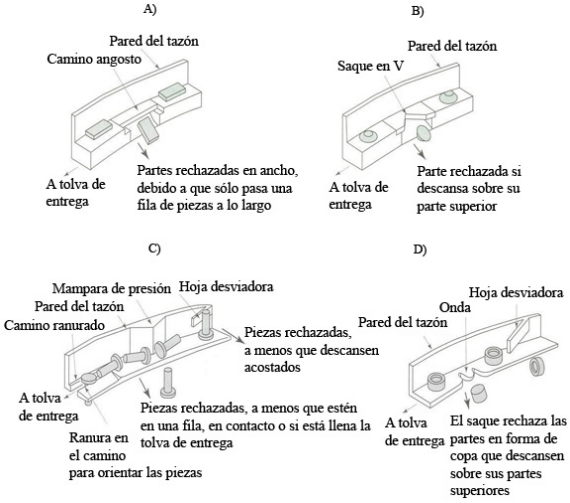

Figura 3. Sistemas de selección de piezas con distintas geometrías [2].

Como se sabe, los cospeles obtenidos tienen un ligero filo o rebaba en el mejor de los casos, recordando que lo ideal es no tener rebaba en el cospel. Usando este dato, se diseña un selector de piezas en donde se

identifican los cospeles que tienen rebaba de los que no la tienen. El funcionamiento de este selector de piezas es el siguiente, los cospeles son colocados en un tazón, el cual está montado sobre un vibrador electro-magnético, al comenzar a vibrar el tazón los cospeles comienzan a ser desplazados en el interior del mismo tazón y estos son guiados por medio de un canal en forma de espiral.

En la Figura 4 se observa el diseño final del tazón, en la cual se aprecian los canales que guían el paso de los cospeles. El recorrido de los cospeles se realiza de la parte inferior hacia la parte superior del tazón. Para un funcionamiento óptimo dentro del tazón se coloca hasta un límite de 75 kilogramos de cospeles, esto debido a que el vibrador podría no generar la suficiente vibración para desplazar a una velocidad adecuada los cospeles, incrementando su corriente y generando un calentamiento excesivo en la bobina.

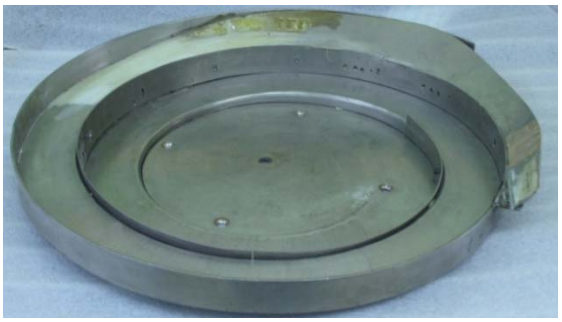

Figura 4. Tazón contenedor de cospeles.

Para hacer el traslado de las piezas dentro del tazón, se implementa un sistema de vibración, el cual está integrado por una bobina que se instala debajo del tazón. El vibrador electromagnético se constituye por diversos elementos; componentes eléctricos como un variador de frecuencia y bobina, y elementos estructurales como un marco y sistema de amortiguación. Con el variador se excita la bobina a diversas frecuencias, que se traducen en vibraciones más largas o más cortas y con esto se regula la velocidad de avance de los cospeles. En la Figura 5 se observa el diagrama de las conexiones correspondientes a la bobina.

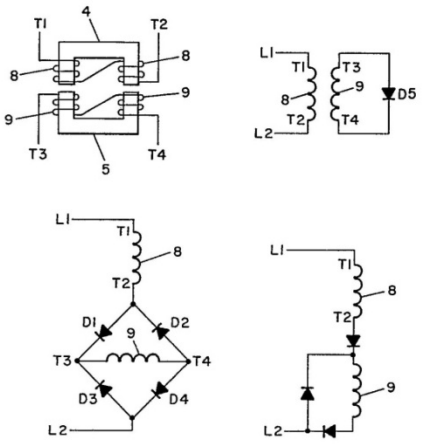

Figura 5. Conexiones correspondientes al sistema de vibración.

En la Figura 6 se ilustra el montaje del vibrador electromagnético, en la cual se observa la lámina que protege la bobina, la base de la bobina está instalada sobre una placa de acero de 2 pulgadas de grosor, la cual proporciona estabilidad al vibrador. Para montar el vibrador se ha instalado un arreglo de resortes de acero estructural, con los cuales se evita que la vibración se transmita a la estructura principal. Sobre la bobina se coloca el tazón, donde son vertidos los cospeles. El vibrador electromagnético funciona con corriente alterna a 127 Volts y 50/60Hz. Con todo lo descrito anteriormente, las piezas son seleccionadas de forma correcta y alimentadas con una velocidad que es regulable.

Figura 6. Vibrador electromagnético.

5.3. Alimentación y dosificación de materia prima.

Las piezas provenientes del tazón contenedor son alimentadas de una en una a un primer dispositivo alimentador, el cual tiene como función alinear los cospeles y así se evitar atascos de materia prima. Este primer alimentador cuenta con un pistón neumático de doble efecto, el cual se encarga de cambiar la posición del cospel.

El pistón de doble efecto cuenta con válvulas reguladoras de caudal en la entrada y salida de aire, los cuales permiten regular la velocidad de avance y retroceso del émbolo. Una vez que el pistón empuja cada cospel, estos cambian su posición 90° para así posteriormente incorporarse a una rampa, cuya función es realizar el cambio de la posición de las piezas en otros 90° aproximadamente, lo que es atribuible a la geometría de la rampa. Un sensor de tipo inductivo montado al principio del alimentador detecta el paso de las piezas, en el momento que se presente una saturación de cospeles, envía la señal al P.L.C. y este a su vez al vibrador, lo que genera que se detenga el abasto de piezas.

En la Figura 7 se observa el diseño de este primer alimentador, así como el proceso correspondiente para voltear cada cospel. En la parte inferior de este primer alimentador se instaló una lámina que tiene forma de V, con la cual los cospeles son guiados al segundo alimentador. Ésta pieza es para conectar o acoplar al primer alimentador con el segundo alimentador y de esta forma asegurar la correcta caída de cospeles.

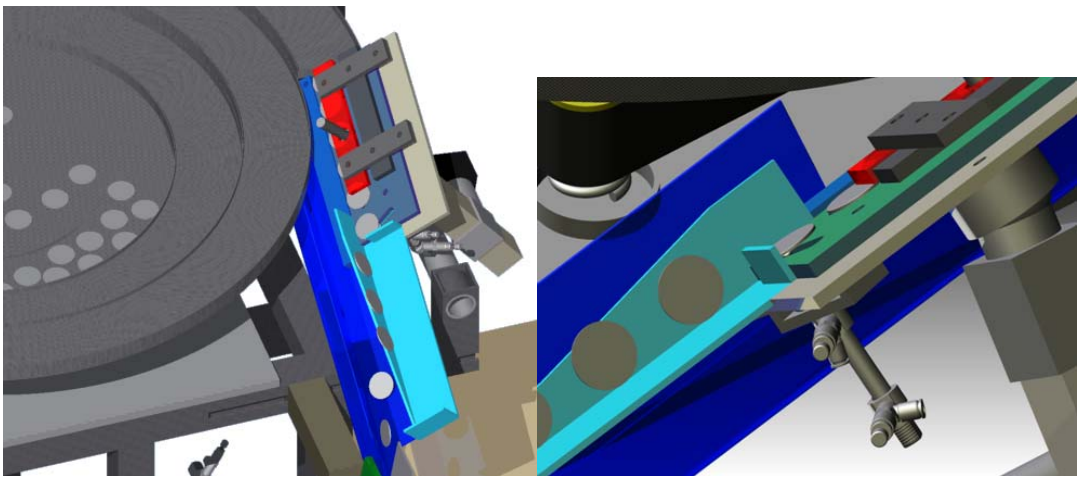

Figura 7. Primer alimentador de piezas.

El segundo alimentador de piezas, consta de tres sensores inductivos, los cuales realizan la detección de piezas en el alimentador además de enviar la señal a los pistones neumáticos dosificadores de cospeles instalados en la parte inferior del segundo alimentador. Los cospeles provenientes del primer alimentador se van alojando en el fondo de este segundo alimentador, uno tras otro se van juntando hasta alcanzar un nivel óptimo, alcanzado este nivel se comienza con la dosificación de cospeles a la matriz del troquel. Los sensores inductivos; de abajo hacia arriba, el primer sensor sirve para detectar materia prima en el alimentador, el segundo sensor (altura ajustable) determina el nivel óptimo de materia prima, y el tercer sensor (también de altura ajustable) determina si el alimentador ha alcanzado un nivel máximo de cospeles. En la Figura 8 se observa el segundo alimentador de piezas, así como los pistones dosificadores.

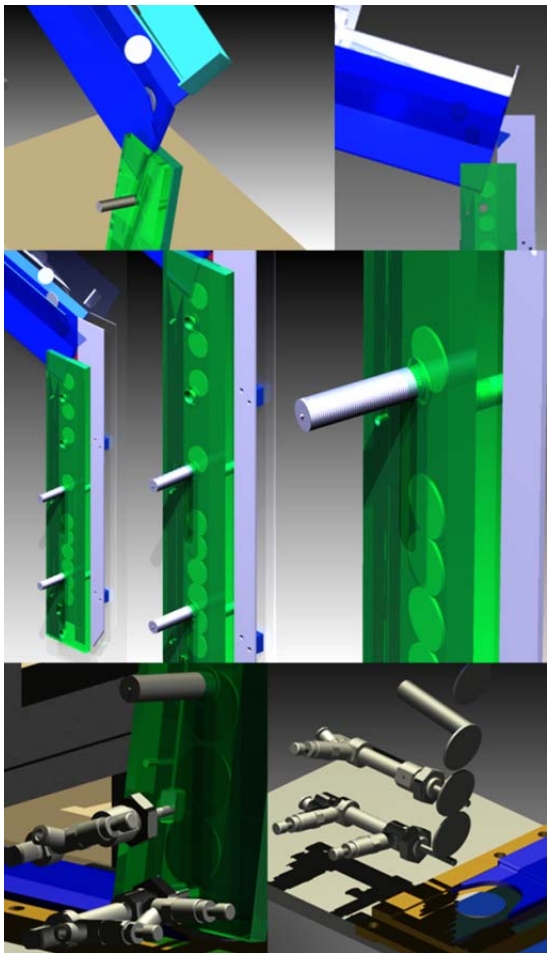

Figura 8. Segundo alimentador de piezas con pistones neumáticos dosificadores.

El segundo alimentador de cospeles cuenta con dos pistones neumáticos, uno de doble efecto y otro de simple efecto. De arriba hacia abajo, el primer pistón es de simple efecto, su función es retener los cospeles almacenados en el segundo alimentador mientras el cospel inmediato inferior es dosificado a la matriz. Una vez que se ha dosificado el cospel, el pistón de simple efecto retrae su émbolo y deja caer los cospeles que habían sido retenidos. El segundo pistón es un pistón de doble efecto, con el cual es dosificado el cospel a la matriz, este pistón se energiza una vez que se ha alcanzado el nivel óptimo de materia prima en el segundo alimentador y el pistón de simple efecto ha atorado los cospeles superiores y es entonces cuando el pistón de doble afecto libera el último cospel y cae a la corredera donde después es colocado en la matriz del troquel. Una vez colocado el cospel en la corredera final, el ciclo de dosificación de cospeles se vuelve a repetir hasta finalizar con el último cospel. El segundo alimentador cuenta con un sistema que permite ajustar su ancho en función del diámetro del cospel con que se trabaje, de la misma forma los sensores inductivos también son ajustables dependiendo del diámetro del cospel.

5.4. Colocación de materia prima en matriz de troquel.

Esta es la etapa final del proceso, y consiste en realizar el debido desplazamiento de las piezas dosificadas por el segundo alimentador a la matriz del troquel. Para ello se dispone de una deslizadera, la cual es manipulada por un pistón neumático de doble efecto, esta deslizadera es de carrera ajustable a través del pistón, su adaptación a la matriz del troquel es muy versátil, ya que no es necesario un medio especial para realizar el acoplamiento a la troqueladora, únicamente se orienta de manera horizontal a la base y con la matriz del troquel. El acoplamiento de la deslizadera a la troqueladora se observa en la Figura 9, la cual muestra que los postes guías del troquel y la matriz no se han modificado, así no existe la necesidad de alterar el herramental para realizar el acoplamiento.

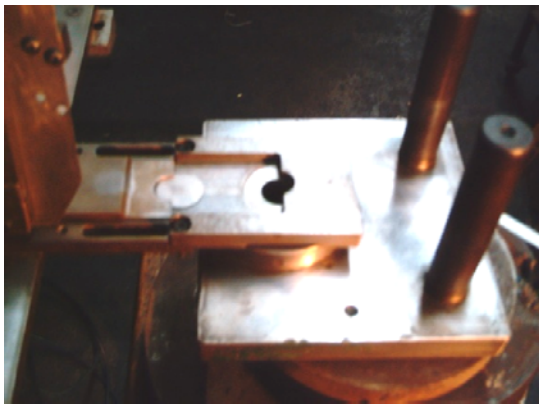

Figura 9. Acoplamiento matriz-deslizadera.

En caso de requerir algún tipo de lubricante para los cospeles, se realiza usando aspersores de propósito especial, todo en función del tipo de lubricante a usar, el cual es rociado en cantidades controladas sobre la base de la guía de la corredera y de esta forma se lubrica la pieza.

5.5. Etapa de control del sistema y adquisición de datos.

La etapa de control del alimentador automático es llevada a cabo por un P.L.C. de uso industrial moderado de la marca SMC, con el cual es desarrollado el programa que coordina toda la etapa de mando, así como la etapa neumática, y de la misma forma el uso de este P.L.C. provee una interfaz muy dinámica con el equipo ordenador, y haciendo uso de los accesorios compatibles del P.L.C., se desarrolla una interfaz de usuario (GUI) de fácil acceso usando el programa LabView (NI). La máquina alimentadora automática cuenta con un gabinete de control montado a un costado de la estructura principal, en el cual se instala el gabinete donde se aloja el P.L.C., el variador de frecuencia de la bobina, la electroválvula, las conexiones correspondientes de alimentación, así como la interfaz para adquisición de datos, esto último de forma interna. Externamente el gabinete del P.L.C. cuenta con su unidad de mantenimiento para la preparación de aire para los pistones, todo de la marca SMC. En la Figura 10 se observa el diseño básico del gabinete de control y sus dispositivos correspondientes.

Figura 10. Instalación de gabinete de control con sus accesorios.

6. Estructura y actuadores neumáticos.

La estructura está diseñada y elaborada con perfil tubular rectangular, de 38.1 mm de cada lado y con un espesor de 3 mm. Éste perfil cuenta con excelentes prestaciones mecánicas, además es de bajo costo. Sus propiedades mecánicas son [3]:

Acero de bajo carbono
Esfuerzo de tensión: 3160 kg/〖cm〗^2
Esfuerzo de fluencia: 2740 kg/〖cm〗^2
Elongación en 50 mm: 21%

Por otra parte, los cilindros neumáticos son seleccionados en función de la fuerza necesaria y de la presión de trabajo. Para hacer esto, se deberán aplicar diversos criterios, tales como la fuerza de pandeo admisible del vástago y el consumo del aire [4]. Con los valores que se indican en tablas, los cilindros alcanzan velocidades que, en la mayoría de los casos, son suficientes para las aplicaciones normales. Sin embargo, para un cálculo más exacto, debe tomarse en cuenta lo siguiente: en neumática se trabaja con la energía almacenada por la presión y el caudal de un fluido. Se seleccionan pistones en base a la tarea a realizar y las características de las piezas a desplazar, debido a que el peso de los cospeles es casi despreciable (1.6 grs), se hace la selección en base del diámetro del vástago y la carrera máxima permisible, además los pistones seleccionados operan con una presión admisible de 3 a 6 bar. Para obtener la velocidad de los pistones, se parte de la selección de ellos, usando la distancia a recorrer en un tiempo determinado. Se obtiene la siguiente la velocidad:

$$v = \frac{24\ mm}{0.75\ s} = 32\ mm/s \tag{1}$$

Donde; 24 mm es la distancia o carrera del pistón de entrada más la de salida; 0.75 s es el tiempo en que se debe cubrir la distancia. Con la velocidad obtenida se alimentan aproximadamente 1.5 piezas por segundo. Para obtener esta velocidad se debe calcular el flujo volumétrico Q que se necesita en la entrada y salida de los actuadores neumáticos. Partiendo de la Ecuación (2) se obtienen los flujos correspondientes.

$$Q = v \cdot A \tag{2}$$

En la Figura 11 se observa la entrada de Q_1 y Q_2 correspondientes a la válvula reguladora. Así como la configuración interna de la válvula reguladora de caudal correspondiente al pistón de doble efecto. En la posición de Q_1 se alimenta la válvula con el aire proveniente del compresor, y en la salida Q_2 se conecta el pistón.

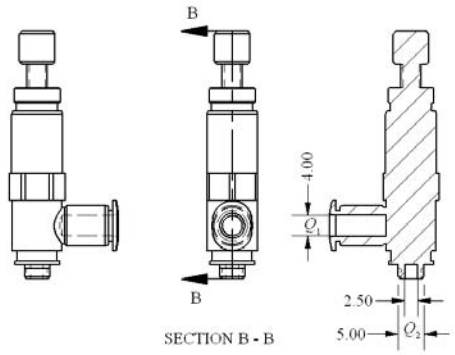

Figura 11. Vista de las posiciones de conexión y constitución interna de la válvula reguladora (acot. mm).

Con lo anterior se obtiene lo siguiente:

- Q_2=0.000157 l/s
- V_1=12.5 mm/s

Estos valores corresponden al caudal y velocidad de la válvula reguladora, con ellos se obtienen las velocidades teóricas en el pistón de doble efecto. Este procedimiento se realiza para cada actuador neumático. Con el monitoreo de los cilindros neumáticos, se obtienen las Figuras 12 y 13, las cuales indican el comportamiento del cilindro a lo largo de la tarea a realizar. Los datos considerados son los siguientes:

- Longitud de carrera requerida: 10 mm.
- Presión de funcionamiento: 6 bar.
- Masa en movimiento: 1.62 grs.
- Tiempo total de recorrido: 0.375 s.

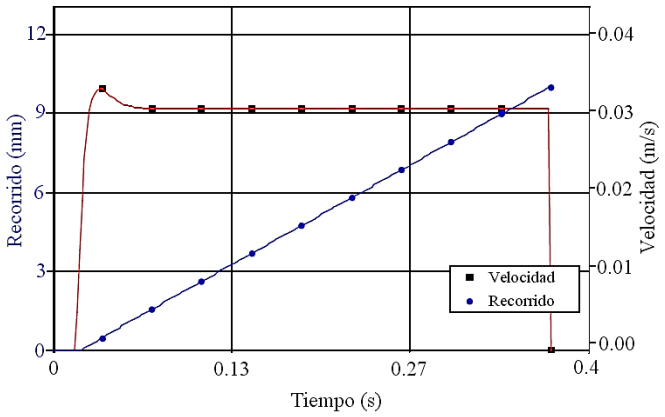

Figura 12. Resultados cilindro simple efecto; Tiempo-Recorrido-Velocidad.

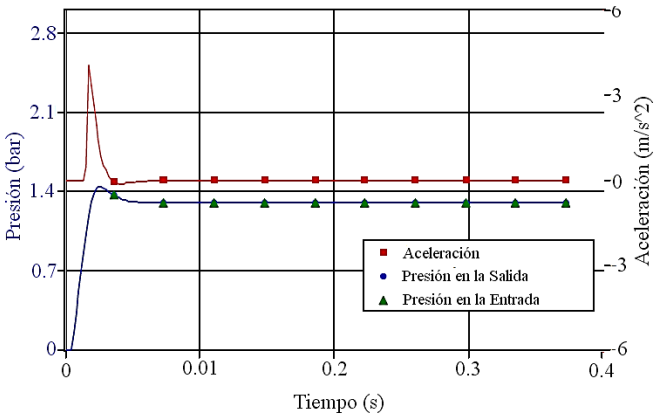

Figura 13. Resultados obtenidos cilindro simple efecto; Tiempo-Presión-Aceleración.

En la Figura 12 se observa el comportamiento del pistón de 12 milímetros de carrera de simple efecto, arroja un comportamiento proporcional en cuanto al recorrido vs tiempo. La Figura 13 muestra el comportamiento del mismo cilindro de simple efecto con respecto a la presión y aceleración.

7. Prototipo final.

Ya con el diseño analítico y numérico, se continúa con el proceso de manufactura del alimentador, el cual no requiere de procesos complejos, únicamente cortes de perfil, uniones soldadas, elaboración de barrenos, pintura, colocación del gabinete de control e instalación de los componentes alojados en su interior, como las electroválvulas y cajas de conexión, así mismo se programa el P.L.C. En la Figura 14 se muestra una fotografía correspondiente al alimentador ya como producto final, donde se representa en color amarillo la lámina que aloja en su interior a la bobina correspondiente al vibrador electromagnético, en su parte superior se visualiza el tazón donde es depositada la materia prima, los alimentadores de cospeles y otros dispositivos propios que conforman al alimentador.

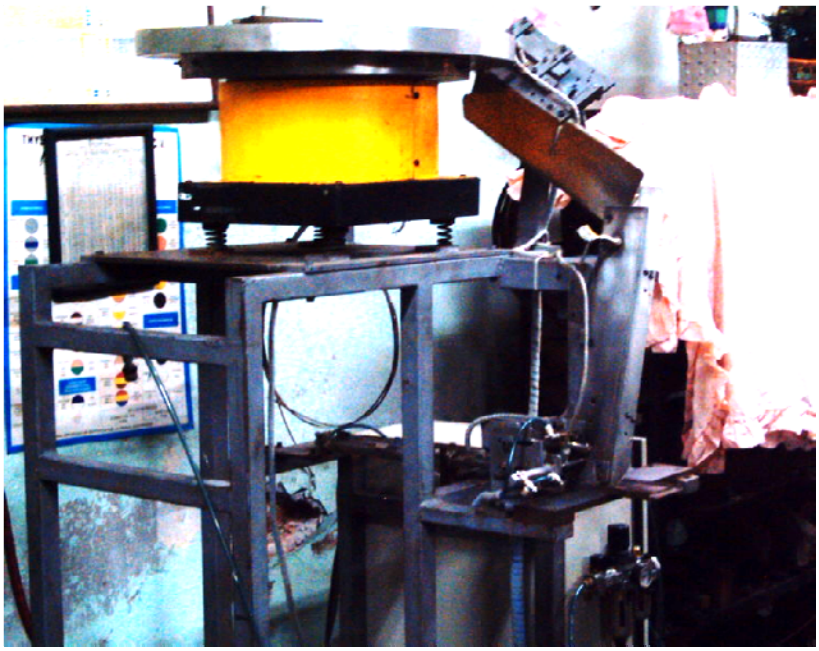

Figura 12. Alimentador de cospeles final.

8. Resultados finales obtenidos.

Se obtuvo una alimentación final de 72.5 piezas por minuto, (1.2 pzas/s). Este dato se obtiene después de elaborar varias pruebas, en las cuales se obtuvo en promedio esta cantidad. Esta cantidad aumenta variando la vibración de la bobina y el caudal de admisión de los pistones, en estudios posteriores se alcanzaron alimentaciones de hasta 2 piezas por segundo. En este estudio se decide manejar la cantidad de 1.2 pzas/s debido a que la máquina fue sometida a un intenso ciclo de trabajo y ajustar los parámetros con otras velocidades implicaría nuevamente una inversión de tiempo. La Tabla 1, muestra la producción de sellos de monoblock obtenidos durante una hora, en comparación con los obtenidos en una posición de trabajo en el mismo intervalo de tiempo. Se observa que la cantidad de sellos o cospeles embutidos fue casi del doble con respecto al método manual.

De la misma forma, usando el nuevo sistema de alimentación se reduce el número de cospeles introducidos de forma errónea en la matriz del troquel. En la Figura 13 se observa el valor obtenido al final de cada jornada laboral. Estos valores dependerán en gran medida de la habilidad del operador y de la calidad del cospel.

Tabla 1. Sellos de monoblock obtenidos por hora.

Tiempo (minutos)	# Sellos de Monoblock Obtenidos	
	1 Posición	Nuevo sistema
1	35	72
5	175	360
10	350	720
15	525	1080
20	700	1440
25	875	1800
30	1050	2160
60	2100	4320

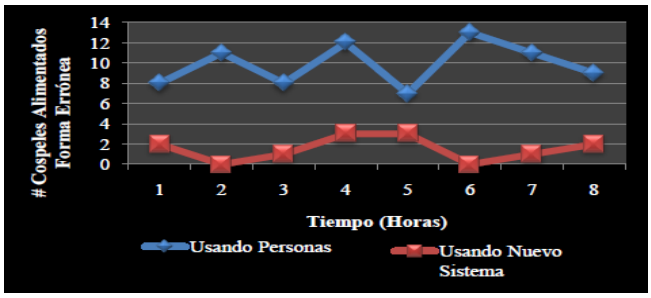

Figura 13. Cantidad de cospeles introducidos de forma errónea durante una jornada laboral de 8 horas.

Otro punto importante es el costo de este alimentador en comparación con otros que existen en el mercado.

- Costo final del nuevo alimentador automático: $136 mil pesos. Con todos los gastos generados e impuestos incluidos.
- Costo de otros sistemas de colocación de piezas elaborado por FESTO PNEUMATIC SA de CV: $550 mil pesos. Más gastos de transportación, más gastos por capacitación y operación, más impuestos.

9. Conclusiones.

Se evita la interacción directa operador-máquina, y se reduce significativamente la posibilidad de que ocurra algún accidente hacia el operador.

Con el diseño de sistema de alimentación se aumenta la producción de piezas y al mismo tiempo se mejora la calidad del producto final reduciendo drásticamente las piezas que son mal formadas, con el nuevo sistema de alimentación es posible obtener una alimentación de cospeles mayor, esto en función del material y sus características físicas.

Se diseña de manera satisfactoria un dispositivo que se encarga de llevar a cabo la automatización de un proceso.

Finalmente, en comparación con otros dispositivos, los costos totales para la fabricación de uno con respecto a otro varían de forma significativa.

Referencias

[1] Amstead, B. H., Ph. Oswald, F., Begeman, L. Procesos de Manufactura, Edit.: C. E. C. S. A. México, 2002.
[2] Boothroyd, G. Fundamentals of Machining and Machine Tools, Edit. CRC Pr. I. Llc, 2005.
[3] Aceromex. Catálogo de Perfiles Estructura Rectangulares, México, 2009.
[4] Meixner, H., Kobler, R. Introducción en la Nuemática: Manual de Estudio, Edit.: FESTO, 1988.

INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

1. De la página www.mecamex.net/revistas/LMEM descargar el formato oficial de la revista.

2. Enviarlo a la dirección electrónica vinculacion_revista@mecamex.net

3. Recibirá un correo de confirmación de recepción, así como un tiempo estimado de respuesta.

4. La publicación de la revista es cuatrimestral, y el momento de la publicación una vez aceptado el artículo, la publicación dependerá de la disponibilidad del siguiente número.