

# PISTAS

## Educativas

NUEVA ÉPOCA • No. 119 • SEPTIEMBRE 2016 • ISSN 1405-1249

SEP  
SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CELAYA



**CISMe**  
CONGRESO INTERNACIONAL  
EN SISTEMAS MECATRONICOS

28  
29  
30  
2016  
SEPTIEMBRE

## TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

**Manuel Quintero Quintero**  
Director

**DIRECTORIO ITC**  
**MED. Ignacio López Valdovinos**  
Director

**MC. Martha Carreño Juárez**  
Subdirectora Académica

**M.F. Martín Campos Moreno**  
Subdirector de Servicios Administrativos

**MC. Julián Ferrer Guerra**  
Subdirector de Planeación y Vinculación

**MDPH Teresita de las Nieves Armengol Rico**  
Jefe del Departamento de Desarrollo Académico



**PISTAS EDUCATIVAS**  
pistaseducativas@itcelaya.edu.mx

**COMITÉ EDITORIAL**  
Héctor Rojas Garduño  
Juan José Martínez Nolasco

*Pistas Educativas* es una publicación impresa del Departamento de Desarrollo Académico del Instituto Tecnológico de Celaya.

Los artículos y ensayos son responsabilidad de sus autores y no expresan necesariamente la ideología de la institución ni de la revista. En caso de citar la información de los contenidos se agradecerá dar los créditos a los autores, sus obras, así como a esta fuente.

Dirección: Antonio García Cubas Pte. No. 600 Esq. Av. Tecnológico, C.P. 38010, Celaya, Gto. Tel. 01-(461)-61-175-75. Fax. 01-(461)-61-179-79. Certificado de Licitud y Contenido 6216 y 4777, respectivamente. Registro de Derecho de Autor, Expediente de Reserva: 6 98 92. ISSN 1405-1249.

## PISTAS EDUCATIVAS No. 119, septiembre 2016

### Contenido

EDITORIAL .....	1
TABLERO DE PLC, PARA CAPACITACIÓN EN EL TRABAJO <i>Candía García Filiberto, Galindo López Víctor, Carmona Rendón Juan C., González Hernández Andrea.....</i>	2-19
DISEÑO DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO ENBEBIDO PARA EL MONITOREO LOCAL Y A DISTANCIA DE LOS SIGNOS VITALES DE UN SER HUMANO <i>Cárdenas Gaytán Luis Eduardo, García Mendoza Armando..</i>	20-27
TERMÓMETRO FINANCIERO MÓVIL PARA CONCIENTIZAR EL MANEJO DE LOS INGRESOS UNIVERSITARIOS <i>Contreras González Meliza, Bello López Pedro, Cervantes Márquez Ana Patricia, Rodríguez Hernández Miguel .....</i>	28-36
SISTEMAS DE MONITOREO EN TIEMPO REAL BASADO EN FPGA PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN <i>Cruz Miguel Edson Eduardo, Rodríguez Reséndiz Juvenal...37-48</i>	37-48
ANÁLISIS TRANSITORIO DE ESFUERZOS PARA UNA BARRA TRANSMISORA DE PMMA EMPLEADA EN UN SISTEMA HOPKINSON <i>Escobedo Carranza Ivonne Ruth, Alcaraz Caracheo Luis Alejandro.....</i>	49-56
EMULADOR DE SEÑALES PARA PRUEBAS EN CONTROLADORES DE SISTEMAS TRIFÁSICOS <i>Estrada Rojo Leonel, Ortega Alejos Julio, Fuentes Hernández Carlos Alberto.....</i>	57-65
CONTROL DE PÉNDULO INVERTIDO UTILIZANDO TEORÍAS DE CONTROL CLÁSICO Y TÉCNICAS DE VISIÓN <i>González Sánchez Bruno, Laguna Estrada Martín.....</i>	66-89
SISTEMA DE SEGURIDAD EN ESTUFAS <i>Hernández Hernández Arturo, Hernández Miranda Sergio Daniel, Becerra Rodríguez María Blanca, Arguelles Vorrath Fabritzia Celia.....</i>	90-102
ARQUITECTURA PARA EL RECONOCIMIENTO DE EMOCIONES BASADO EN CARACTERÍSTICAS FACIALES <i>Herrera Santiago Elsa Irene.....</i>	103-116
DESARROLLO DE HERRAMIENTAS DE VISIÓN ARTIFICIAL EN MATLAB PARA INSPECCIÓN DE TARJETAS PCB <i>Méndez Guzmán Hugo Antonio, Martínez González Adrián.....</i>	117-132
IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPO DE UNA MAQUINA DE GRABADO CON LÁSER CONTROLADA POR UN RASPBERRY PI <i>Orozco Mendoza Horacio, Zavala Villalpando José Guadalupe, Rodríguez Sotelo Karla Alejandra, Calderón Nieto Omar.....</i>	133-147
CONTROLADOR DIGITAL DE UN RECTIFICADOR PWM MONOFÁSICO, IMPLEMENTADO EN UN DISPOSITIVO PROGRAMABLE DE BAJO COSTO <i>Ortega Alejos Julio, Estrada Rojo Leonel, Rodríguez Segura Elías J. J., Fuentes Hernández Carlos A., Lemus Calderón Juan Pablo.....</i>	148-164
FIXTURA DE PRUEBA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE CONTROLADORES PARA CONVERTIDORES BIDIRECCIONALES DE CD <i>Ortega Alejos Julio, Estrada Rojo Leonel, Aguilera Ibarra Alejandro, López Álvarez Luis Gerardo, Pérez Vera Luis David.....</i>	165-180

**PLATAFORMA DE MONITOREO DE UN SISTEMA EÓLICO UTILIZANDO EL MÉTODO DE APRENDIZAJE “PROJECT-ORIENTED PLOBLEM-BASED”**

*Peña Aguirre Julio Cesar, Jiménez Garibay Alonso Alejandro.....181-195*

**METODOLOGÍAS DE SOLUCIÓN DE DIVERSOS PROBLEMAS PRESENTADOS EN EL DISEÑO Y DESARROLLO DE UN CONTROLADOR TÉRMICO**

*Bravo Sánchez Micael Gerardo, Ramírez Montañez Julio Alberto, Martínez Nolasco Juan José.....196-204*

**SISTEMA EXPERTO DETERMINISTA PARA EL DIAGNÓSTICO DE ENFERMEDADES ERITEMATO-ESCAMOSAS EN PROLOG**

*Ramírez Pérez Norma Verónica, Azura García Gerardo, Corona Rodríguez Francisco Javier, Ramírez García Juana Rubí, Sánchez Martínez Humberto.....205-216*

**MÁQUINA RECUPERADORA DE CABLE PARA RECICLADORAS**

*Rendón Sustaita Gloria del Carmen, Domínguez López José Ángel, Martínez Apolo Hugo, Avella Reyna Juan Carlos, Arenas Camos David Alfredo, Dávila Barrón Juan Israel, Guerrero Martínez Ana Paula.....217-223*

**REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DEL EFECTO DE PROCESOS DE FABRICACIÓN SOBRE ESFUERZOS EN COMPONENTES DE ALUMINIO**

*Reséndiz Juárez Sara Inés, Rodríguez Castro Ramón, López Vargas Erik, Valdés García Oscar Fernando, Alcaraz Caracheo Luis Alejandro.....224-233*

**CONTROL GLOBAL PD PARA UN SEGUIMIENTO DE POSICIÓN EN MOTORES A PASOS DE IMANES PERMANENTES**

*Valencia Moctezuma Maximiliano, Mendoza Mondragón Fortino, Hernández Guzmán Víctor Manuel.....234-248*

**SISTEMAS DE DETECCIÓN DE FUGA DE CAMPO MAGNÉTICO EN MATERIALES FERROMAGNÉTICOS**

*Villegas Saucillo J. Jesús, Herrera May Agustín L., Díaz Carmona José Javier, García Lona Gerardo I., Marroquín Gutiérrez André, Pacheco Ríos Luis Eduardo, Uribe Ramírez Guadalupe Josué.....249-267*

## EDITORIAL

El Congreso Internacional en Sistemas Mecatrónicos “CISMe” se ha constituido como un espacio académico para que estudiantes, profesores e investigadores compartan un entorno enriquecedor donde crecer profesionalmente y compartir sus inquietudes, a través de la difusión de los avances científicos y tecnológicos de la ingeniería mecatrónica y áreas afines.

Como resultado del arbitraje de los artículos recibidos en base a la convocatoria de CISMe 2016, 20 fueron aceptados y seleccionados para publicarse en este número especial, el 119, de nuestra revista “Pistas Educativas”. Estos artículos presentan los resultados de investigaciones en áreas afines a la mecatrónica, tales como la Ing. Mecánica, la Ing. Electrónica y la computación.

El Departamento de Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Celaya agradece a la comunidad tecnológica su interés por hacer de CISMe un referente importante a considerar en la planeación de sus actividades de investigación. Así, cada año, esperamos ofrecerles un evento de altura, de acuerdo sus expectativas. Finalmente, vaya un sincero reconocimiento a todos los coordinadores y evaluadores por su compromiso y voluntad mostrada en todo el proceso de planeación y realización del congreso. Fruto de su trabajo, es este número especial de nuestra revista.

¡Felicidades!

Abdón Javier Ruiz Guerrero  
Jefe del Departamento de Ingeniería Mecatrónica

# **TABLERO DE PLC, PARA CAPACITACIÓN EN EL TRABAJO**

***Filiberto Candía García***

Facultad de Ingeniería, BUAP

*filinc@hotmail.com*

***Víctor Galindo López***

Facultad de Ingeniería, BUAP

***Juan C. Carmona Rendón***

Facultad de Ingeniería, BUAP

***Andrea González Hernández***

Facultad de Ingeniería, BUAP

## **Resumen**

Este trabajo se enfoca en la realización de un tablero de control eléctrico para la capacitación en el trabajo de los PLC basado en un PLC S7-1200 de Siemens. Con este tablero los participantes contarán con un referente didáctico-industrial en la capacitación para el trabajo en control eléctrico por PLC en diversos niveles educativos. Por su arquitectura abierta, apoyada para su conexión eléctrica en clemas y no en jacks, el desarrollo de este prototipo cuenta con elementos y condiciones industriales para activar los módulos de entradas y salidas del PLC. Se desarrolla el diseño y construcción de un tablero de control eléctrico para capacitación en PLC, que se adapta a diversos esquemas de habilitación laboral, dando prioridad a la instalación, operación y programación de manera respectiva. Como innovación se plantea un prototipo de tablero genérico capaz de ofrecer un entrenamiento específico a los profesionistas involucrados en la actualización a los

procesos productivos controlados por relevadores y escalados a control por PLC.

**Palabra(s) Clave(s):** capacitación para el trabajo, PLC, prototipo didáctico.

## **1. Introducción**

En la actualidad la reutilización y actualización de equipo es una de las áreas que algunas compañías han visto como potenciales áreas de oportunidad, para reducir costos de operación y es precisamente en este sector donde el personal de diseño de equipo o maquinaria debe tener la visión para que los equipos puedan crecer o modificarse, ya sea para efectuar otros procesos o simplemente tener ciertos cambios para incrementar la productividad y calidad (Soria Tello, 2013).

Por lo tanto se ha identificado que el sector laboral no cuenta con un referente académico (instituciones públicas o privadas) que proporcionen una solución específica a sus procesos. Siendo indispensable para ellos, el implementar talleres de capacitación o bien solicitar programas de capacitación directamente a fabricantes y distribuidores. Acciones que representan un alto gasto en capacitación y adiestramiento hacia su personal.

Entonces la problemática se integra por la falta de prototipos didácticos modulares que permitan la integración de capacitación para el trabajo en PLC's en diversos niveles cognitivos de enseñanza (técnico, licenciatura y posgrado) y dirigidos a diversos puestos laborales (instaladores, operarios y programadores). Siendo que el proceso de enseñanza-aprendizaje de la mecatrónica requiere de laboratorios equipados con módulos entrenadores que integren los sistemas de control; eléctricos, electrónicos, mecánicos y de software. Sin embargo, este tipo de laboratorios son extremadamente caros y es difícil que las instituciones educativas que inician esta especialidad puedan adquirir laboratorios completos de este tipo y sobre todo ofertar una oferta académica en capacitación para el trabajo.

Como tendencia de la automatización de la producción (procesos Lean Manufacturing) el control eléctrico se ha diversificado en varios modelos analíticos y prácticos, encontrándose en el mercado múltiples soluciones para una misma necesidad de un sistema de producción en serie. Esta diversidad va desde el control cableado (On-Off) hasta los sistemas SCADA (lazo cerrado).

En este camino de innovaciones se encuentra el control por PIC's, PAC's y el control por PLC's, siendo este último el de mayor aceptación en el sector industrial por sus ventajas constructivas (trabajo en ambientes industriales) y operativas (empleo en el control cableado y control de lazo cerrado). Siendo vital la programación de los PLC, esta generalmente es realizada por los proveedores de la maquinaria o equipo de automatización, limitando la innovación de los procesos productivos o generando dependencia de la programación hacia las marcas transnacionales.

Por lo que es necesario formar profesionistas en control por PLC en diferentes niveles laborales (operadores, instaladores y programadores), siendo la capacitación técnica en instalación y operación la de mayor demanda en el sector profesional.

Los profesionistas que actualmente se encuentran en el sector laboral y que se dedican al control eléctrico en lazo cerrado o en lazo abierto, están en constante contacto con los dispositivos denominados Controladores Lógicos Programables, (PLC's, por las siglas en inglés de Programmable Logic Controller). Debido a que las empresas han girado a la actividad llamada actualización de equipos, integrando PLC's, para la automatización del proceso.

La continua implementación de procesos basados en la filosofía Lean Manufacturing en el sector empresarial (sin importar el tipo de industria) obliga a los departamentos de planeación, producción y mantenimiento a contar con profesionistas dedicados al control por PLC. Siendo diversos los perfiles de cada departamento, los niveles cognitivos también se diversifican, así los procedimientos de capacitación y adiestramiento se vuelven complejos para las instituciones públicas (escuelas) y privadas (empresas).

Por ello se hace indispensable que se desarrollen estrategias en la capacitación técnica o para el trabajo en; instalación, operación o programación de PLC's, desde la perspectiva de una didáctica global, utilizando equipos o prototipos didácticos genéricos.

El desarrollo del diseño de un tablero didáctico para la enseñanza del control eléctrico por PLC que permita integrar por medio de la capacitación para el trabajo,

a la industria e instituciones educativas mexicanas es urgente e indispensable para mejorar las condiciones productivas del país.

Los prototipos funcionales de desarrollo propio son muy importantes en la innovación tecnológica de la industria mexicana (aún incipiente, Banco Mundial), ya que la dependencia de la tecnología extranjera no permite que las mejoras electromecánicas a los equipos y maquinaria de producción sean llevadas a cabo, cuando se busca la mejora de los procesos dedicados a la fabricación de los bienes o productos.

Siendo indispensable contar con personal calificado y competente en la programación y adecuación de automatismos controlados por PLC, implica llevar a cabo la capacitación específica a los procesos automatizados (tanto en hardware como en software), que acelere la producción o mejoren la calidad de los productos, sin alterar el costo de inversión tanto en nueva infraestructura como en materia prima.

El PLC en el ambiente industrial se puede considerar como una caja negra (otra desventaja en la compra de esta tecnología), puesto que las empresas que desarrollan tecnología resguardan con mucho celo profesional el desarrollo del programa que se encuentra integrado en el equipo de producción y en el proceso secuencial de la fabricación del producto.

### **Panorama actual**

Las empresas privadas proveedoras de equipo de control por PLC encuentran una oportunidad de alto valor agregado a sus productos y a su desarrollo económico en el seguimiento de los servicios o pólizas de mantenimiento integral o garantías, ahora llamados proyectos llave en mano.

Al ser el software de programación de PLC un activo tangible de las empresas que desarrollan tecnología, la elaboración de los programas que controlan los procesos productivos se convierten en un bien intangible de la misma. Llegando a convertirse en el mayor bien que los empresarios no comparten, cuando transfieren tecnología, generando con ello un alta limitante, en el desarrollo

tecnológico de los países subdesarrollados, así como en la innovación de los procesos, pues se llega a carecer de la secuencia y lógica de programación.

Este trabajo que desarrolla un tablero didáctico de control eléctrico para la enseñanza de los PLC's, encuentra su amplia justificación en la oportunidad de capacitación para el trabajo, que representa hacia el sector empresarial y que como consecuencia directa permite a diversos profesionistas en los diferentes niveles cognitivos (técnico, licenciatura y posgrado), adquirir la destreza necesaria en la instalación (nivel técnico) operación (nivel licenciatura) y programación (nivel posgrado) de los PLC's.

## **2. Desarrollo**

La metodología a seguir en el presente trabajo será de tipo intuitivo basada en el método científico. Se recopila para la integración del tutorial de prácticas la experiencia, basada en los recursos del libro *Automatismos Industriales* [1]. Con la referencia en la experiencia profesional se han determinado los contenidos a incorporar en cada práctica, identificando los temas de mayor impacto en la formación para el trabajo en PLC's.

La formación para el trabajo en PLC's, demanda un pleno conocimiento de la industria local y del perfil del capacitando. Se identificando una sólida industria manufacturera metal-mecánica y el desarrollo de la industria de la transformación del plástico [2].

El perfil del capacitando es abierto a cualquier persona que se encuentre trabajando en la temática de los PLC's, ya sea en instalación, programación, mantenimiento u operación de los mismos, en virtud de una inclusión de los nuevos paradigmas de la productividad. Donde la única razón de ser de la producción y con ella de la productividad, su medida y su fin, es el mejoramiento de la existencia humana: de las personas y de las sociedades. Dado que la existencia humana, individual y social, es compleja, todo lo relacionado con ella, es compleja, no tanto en sus fines, sino en sus metas intermedias y en los procesos para alcanzarla [3]. El manual a desarrollar tendrá la capacidad de permitir la capacitación a nivel técnico, licenciatura y posgrado. Las prácticas se proponen de tal manera que se

permita incrementar en nivel cognitivo al cual se está impartiendo capacitación para el trabajo, de acuerdo al nivel de preparación del personal en formación.

Un ejemplo se presenta cuando se trabaja con señales ON-OFF, a un nivel técnico solo se pedirá al alumno presionar el botón pulsador para enviar la señal sin involucrarse en el alambrado y características de la señal. En cambio un estudiante de posgrado deberá observar las características de la señal, el diagrama de alambrado, el acondicionamiento de la señal y la programación del PLC.

La investigación será de corte documental y el trabajo a realizar es de tipo pragmático experimental. La ejecución de las prácticas, permitirá la documentación complementaria al manual de prácticas y al trabajo de investigación. Serán limitantes para extender las ejercitaciones el material complementario y los recursos con los cuales se cuente en la construcción del tablero.

La documentación para argumentar las prácticas será extraída de diversos manuales operativos, acondicionada al léxico regional y realizada con elementos y componentes locales. Buscando que el sistema de capacitación sea de arquitectura abierta y modular. Por ejemplo el uso de clemas en sustitución a los jacks, es una innovación que simplifica el mantenimiento, operación e incrementa la disponibilidad.

Una práctica contendrá:

- Título.
- Objetivo.
- Argumentación teórica de un manual asociado al contenido a impartir.
- Instrucciones.
- Documentación de las experiencias realizadas.

Se deberá contar con un almacén general de equipo de medición y herramientas de taller las cuales serán utilizadas durante el desarrollo de la práctica de acuerdo a las necesidades. Por ello no serán integradas como indicaciones de cada práctica.

Como alcance ese tiene el desarrollo un manual de prácticas y contribuir con una lista de materiales, que guie la construcción de un tablero didáctico para la

capacitación en el trabajo de PLC's. asimismo proporcionar el mejor diseño de la distribución de los componentes y determinar el número mínimo de prácticas necesarias a manera de lograr una sólida formación inicial en el manejo de los PLC's.

Este trabajo define las bases en posteriores desarrollos didácticos para la enseñanza de la automatización teniendo como principal característica ser sistemas abiertos, contruidos con elementos nacionales y normatividad nacionales, con fácil refaccionamiento y escalables a incorporar nuevas tecnologías de entrada y salida de datos al PLC.

El método para desarrollar el manual de prácticas es científico y basado en la imitación y reproducción. Se parte de un manual existente y se extrae la información que se considera adecuada. Durante el desarrollo de las prácticas seleccionadas se documentan las experiencias en prosa e imagen, integrándolas al apartado teórico del proceso.

No se manejan formatos, ni cuestionarios complementarios, debido a que la capacitación es pertinente (de acuerdo a las características de los participantes), dinámica (cursos de 100 horas) y en sitio (aula taller de capacitación). El desarrollo cognitivo que el alumno logre será evidenciado mediante el termino satisfactorio de la práctica, la cual tendrá un proceso de repetición hasta lograr el objetivo deseado.

Las técnicas serán de la didáctica presencial, predominando el estilo kinestésico y pragmático para un alto desarrollo de la habilidad motriz.

Los instrumentos son el modulo didáctico, los equipos de medición y herramientas de taller, que sean necesarios en cada práctica.

### **3. Resultados**

Los controles automáticos o sistemas de control constituyen una parte muy importante en los procesos industriales modernos, donde se les usa principalmente para regular variables tales como la presión, temperatura, nivel, flujo, viscosidad, densidad etc; como se muestra en la figura 1, que es un ejemplo de un sistema de

control para el llenado de un tanque cisterna. Siendo una definición de un sistema de control la siguiente:

“Es un arreglo de componentes físicos conectados de tal manera, que el arreglo pueda comandar, dirigir o regular a sí mismo o a otro sistema” [4].

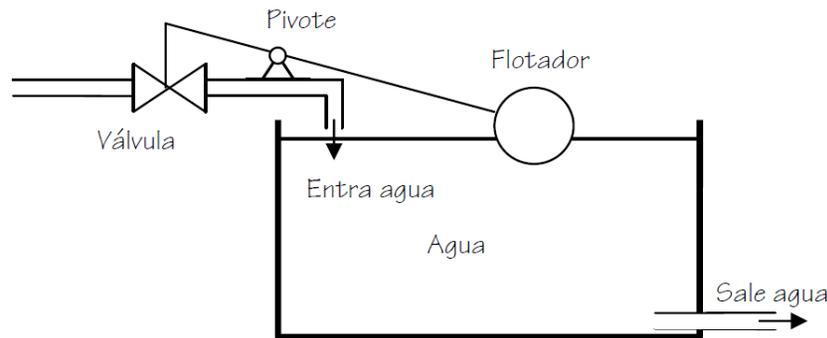


Figura 1 Representación esquemática de un sistema de control.

### Ventajas de un control automático

Las ventajas de un control automático son principalmente económicas, ya que permiten:

- Mejorar la calidad de los productos.
- Disminuir los tiempos de operación.
- Reducir la dependencia de operarios para manejar procesos.
- Reducir costos de producción.

### Elementos de un Sistema de Control

- Proceso a controlar. Es como su nombre lo indica el proceso que se quiere controlar o regular. En la figura 1 se trata de un proceso flujo a través de un tanque en donde se requiere un nivel dado.
- Variable controlada. Es aquella que se mantiene en una condición específica deseada, es la que se quiere controlar. En el ejemplo es el nivel del líquido.
- Variable manipulada. Es la señal sobre la cual se actúa o se modifica con el fin de mantener la variable controlada en su valor. Esta cambia

continuamente para hacer que la variable controlada vuelva al valor deseado. En la figura 1 es el flujo de entrada del líquido o la apertura de la válvula.

- Elemento de medición. Es el encargado de determinar el valor de la variable controlada. En la figura 1 es el flotador.
- Controlador. Es el encargado de determinar qué tipo de acción tomar. En este sistema se integra el PLC como elemento controlador. Si el nivel baja hace abrir la válvula, por el contrario si el nivel sube hace cerrar la válvula.
- Elemento final de control. Es el encargado de realizar la acción de control modificando la variable manipulada. En la figura 1 es la válvula.
- Entrada. Es el estímulo o excitación que se aplica a un sistema desde una fuente de energía externa, generalmente con el fin de producir, de parte del sistema, una respuesta específica.
- Salida. Es la respuesta obtenida de parte del sistema. En la figura 1 la salida es el nivel de líquido.

### **Principios básicos de los PLC**

De acuerdo con la definición de la norma "NEMA [5]" (National Electrical Manufacturers Association) un controlador de lógica programable es: "Un aparato electrónico operado digitalmente, que usa una memoria programable para el almacenamiento interno de instrucciones para implementar funciones específicas, tales como lógica, secuenciación, registro y control de tiempos, conteo y operaciones aritméticas para controlar, a través de módulos de entrada/salida digitales (ON/OFF) o analógicos (1-5 VDC, 4-20 mA, etc.), varios tipos de máquinas o procesos.

La norma IEC 1131 [6], parte 1, define a un PLC como: "Un sistema electrónico de funcionamiento digital, diseñado para ser utilizado en un entorno industrial, que utiliza una memoria programable para el almacenamiento interno de instrucciones orientadas al usuario, para la realización de funciones específicas tales como enlaces lógicos, secuenciación, temporización, recuento y cálculo, para controlar, a través de entradas y salidas digitales o analógicas, diversos tipos de máquinas

o procesos. Tanto el PLC como sus periféricos asociados están diseñados de forma que puedan integrarse fácilmente en un sistema de control industrial y ser fácilmente utilizados en todas las aplicaciones para las que están previstos”.

Si el PLC es un dispositivo de estado sólido, diseñado para controlar procesos secuenciales (una etapa después de la otra) que se ejecutan en un ambiente industrial. Es decir, que van asociados a la maquinaria que desarrolla procesos de producción y controlan su trabajo. Entonces un PLC realiza, entre otras, las siguientes funciones:

- Tomar decisiones en base a criterios preprogramados.
- Recoger datos de las fuentes de entrada a través de las fuentes digitales y analógicas.
- Almacenar datos en la memoria.
- Generar ciclos de tiempo.
- Realizar cálculos matemáticos.
- Actuar sobre los dispositivos externos mediante las salidas analógicas y digitales.
- Comunicarse con otros sistemas externos.

El propósito de este trabajo es: diseñar el prototipo didáctico de un tablero de control eléctrico para la enseñanza de los PLC, que permita la capacitación en el trabajo de profesionistas a nivel técnico, licenciatura y posgrado de acuerdo nivel de profundidad requerido instalación, operación o programación de los PLC's.

Entre los requerimientos intermedios para lograr el objetivo principal es necesario.

- Realizar el modelo CAD del prototipo didáctico de tablero de control para la enseñanza de los PLC.
- Trazar el diagrama unifilar y de alambrado del prototipo didáctico de tablero de control para la enseñanza de los PLC.
- Seleccionar los elementos de control y automatización para integrar el prototipo didáctico de tablero de control para la enseñanza de los PLC.

Se considera que el diseño realizado en el presente trabajo es capaz de utilizar la memoria programable del PLC para el almacenamiento de instrucciones, permitiendo la implementación de funciones específicas como: lógica, secuencias, temporizado, conteo, aritmética, entre otros; con el objeto de controlar la simulación de máquinas y procesos, tanto en control de lazo abierto como control de lazo cerrado.

#### Ventajas del tablero

- Flexibilidad de prácticas en diversos niveles cognitivos
- Implementación de cambios y corrección de errores en sitio
- Reducido espacio físico que se adapta a talleres y laboratorios escolares
- Bajo costo, en comparación con los servicios de los fabricantes
- Ingeniería offline, prueba-simulación en laboratorio
- Rápidos tiempos de scan
- Programación amigable
- Confiabilidad: Un PLC estándar tiene una tasa de falla aprox. de 0.16 fallas/año, mientras que un sistema triple redundante (tanto CPU's como módulos de entrada-salida) 0.003 fallas/año
- Alta mantenibilidad y refaccionamiento
- Documentación de prácticas y fallas

Con referencia en las cualidades de los PLC y en específico del S7-1200 de Siemens se ha configurado la siguiente estructura del tablero:

- Alimentación 120 VCA
- PLC S7-1200 de la marca Siemens
- Entradas (discretas y analógicas)
- Salidas (discretas)
- Rack, bastidor o chasis
- Alta capacidad para realizar prácticas en sitio y en la línea de trabajo.
- Asimismo es capaz de reproducir sistemas productivos que utilizan la metodología Lean Manufacturing

- Capacidad de intercambio de marcas comerciales entre sus elementos de control.
- Conexión externa por clemas (entradas / salidas)

El tablero por su construcción se clasifica como un sistema integrador de elementos de control pasivos y activos. Por su capacidad operativa realiza operaciones con valores digitales y analógicos. De acuerdo a la cantidad de entradas y salidas (E/S) se clasifica como control por PLC nano.

Módulos de Entradas/Salidas:

- Entradas: Digitales 8 Analógicas 2
- Salidas: Digitales 6

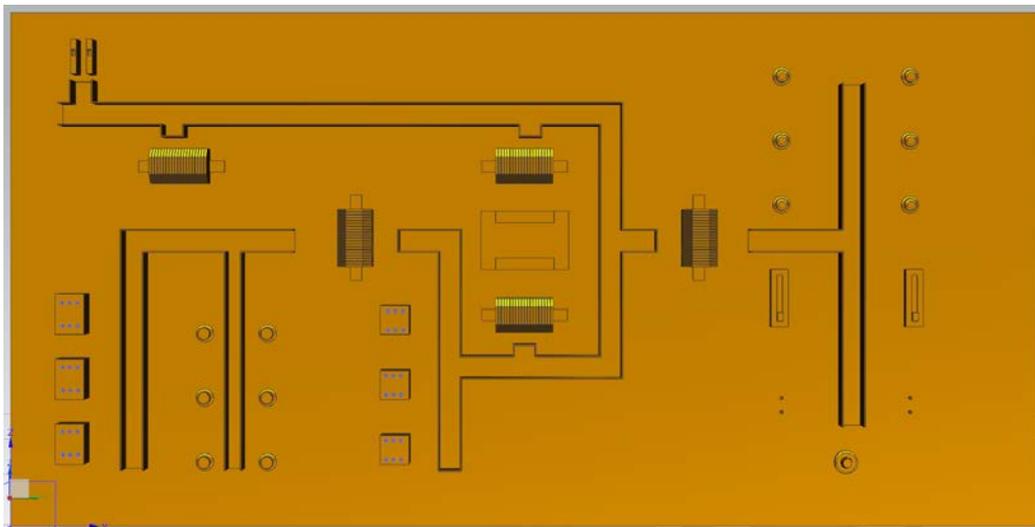


Figura 2 Modelo CAD en 3D del diseño conceptual inicial.

#### 4. Discusión

El proceso innovador en este tablero se refiere al uso de clemas de conexión sobre las conexiones llamadas jacks o conectores hembras y a una doble conexión en las entradas y salidas que permite el uso paralelo de los elementos fijos de control ubicados en el tablero y la integración modular con elementos de otras tecnologías como la hidráulica y la neumática, llegando incluso a integrarse como

un sistema general de automatización (SCADA) que permite sistematizar diversos procesos de producción.

En búsqueda de no minimizar el uso de clemas como un recurso innovador se muestra en la figura 3, un prototipo comercializado por empresas dedicadas al equipamiento de aulas de capacitación [7] y en ella se puede apreciar los conectores “JACK”, los cuales son en la mayoría de las ocasiones de origen extranjero, fabricación especial o discontinuados.

Además el diseño innovador de este tablero permite al profesionista (docente) realizar diversas prácticas en diferentes niveles de profundidad (control lazo cerrado, control lazo abierto, teoría de control, etc.), donde podrá interactuar con sensores, válvulas de control, motores y demás elementos de control; desde diferentes perspectivas, como la reproducción, la creatividad y la innovación.



Figura 3 Equipo de capacitación para PLC, marca AMATROL.

La figura 4, muestra de manera explícita la necesidad sobre desarrollar y transferir tecnología propia, hacia la modalidad educativa de capacitación para el trabajo. La imagen muestra las condiciones de un aula taller que se pueden extender hacia diversas Instituciones Educativas (públicas, privadas y empresariales) y sistemas educativos (nivel técnico, licenciatura y posgrado).

Trabajar bajo condiciones poco favorables para el aprendizaje crea dependencia sobre las cualidades del educador y su capacidad creativa e innovadora, para el desarrollo de zonas de desarrollo próximo, recomendada por Vygotsky [8].

Por ello favorecer los prototipos didácticos como el actual es un paso adelante hacia la cobertura y demanda laboral sobre contar con recursos humanos con alta habilitación y capacidad para trabajar con PLC's. La figura 5, representa la plataforma base para el desarrollo del prototipo la cual es una platina industrial de corte comercial como las usadas en los tableros eléctricos industriales.



Figura 4 Aula taller de la modalidad educativa de Capacitación para el Trabajo.

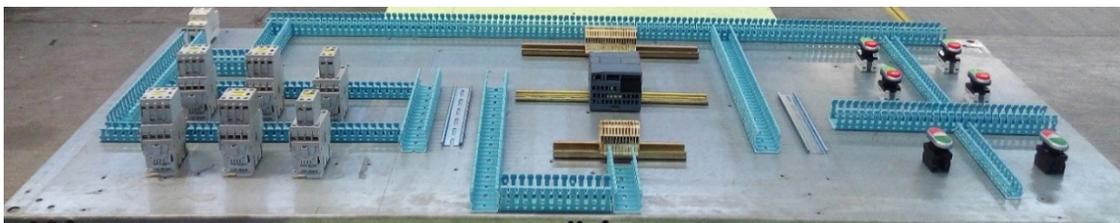


Figura 5 Plataforma base, para el desarrollo del tablero de control.

En la figura 6, se muestra la disposición y manejo de los dispositivos de control y potencia, para controlar procesos de fabricación automatizados. De esta manera el manejar una platina comercial permite identificar la organización de los elementos de control y potencia para su posterior montaje dentro del gabinete. Sin duda alguna el proceso de alambrado de los tableros de control, requiere de una experiencia vivida y sustentada en la repetición y en el ensayo y el error. La interpretación de los diagramas de alambrado requiere de una conceptualización concreta sobre la disposición de las terminales de conexión en un PLC (ver figura 7). Por lo tanto asociar un diagrama de alambrado con su componente físico resulta ser un estímulo (refuerzo cognitivo) que de acuerdo a la taxonomía de Bloom [9]

puede ubicarse en el nivel más alto de adquisición del conocimiento, la evaluación, mediante la cual tomara la decisión de una adecuada conexión eléctrica.



Figura 6 Tablero de tipo industrial para alojar circuitos de control y potencia.

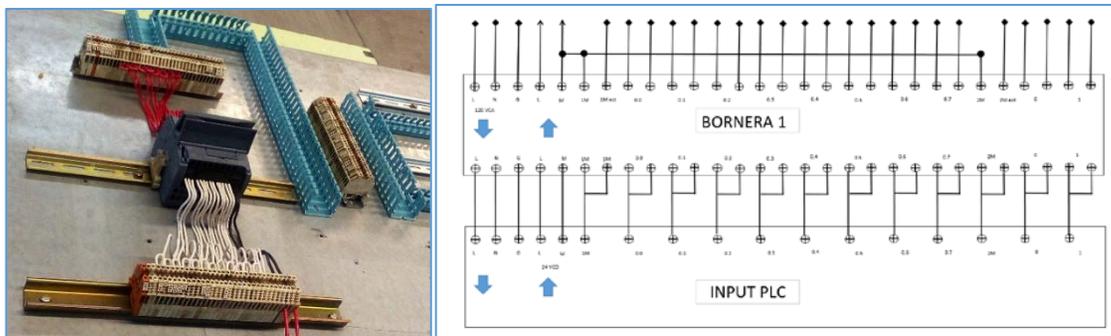


Figura 7 Diagrama de conexión y su asociación con el componente físico.

Siendo la mayor ocurrencia de falla eléctrica las inadecuadas conexiones o las terminales flojas que se han desconectado, es indispensable que un trabajador que opere sistemas automatizados por PLC, sea capaz de conectar un dispositivo de control o de diagnosticar fallas a través del uso de un multímetro y un diagrama de conexiones.

Tener la capacidad de interpretar el funcionamiento de los dispositivos de control a través de un programa de PLC (figura 8), requiere que la habilidad de asociar de cada elemento de control con la secuencia de operación de cada entrada o salida

de los PLC's. Por ello contar con un referente de arquitectura abierta y modular de un tablero de control (figura 9) apoya el proceso de programación e interpretación de secuencias de operación, asimismo de manera indiscutible permite reproducir la experiencia mediante ejercitación de conexión de los elementos de entrada (botones y sensores) y salida (relevadores) al PLC.

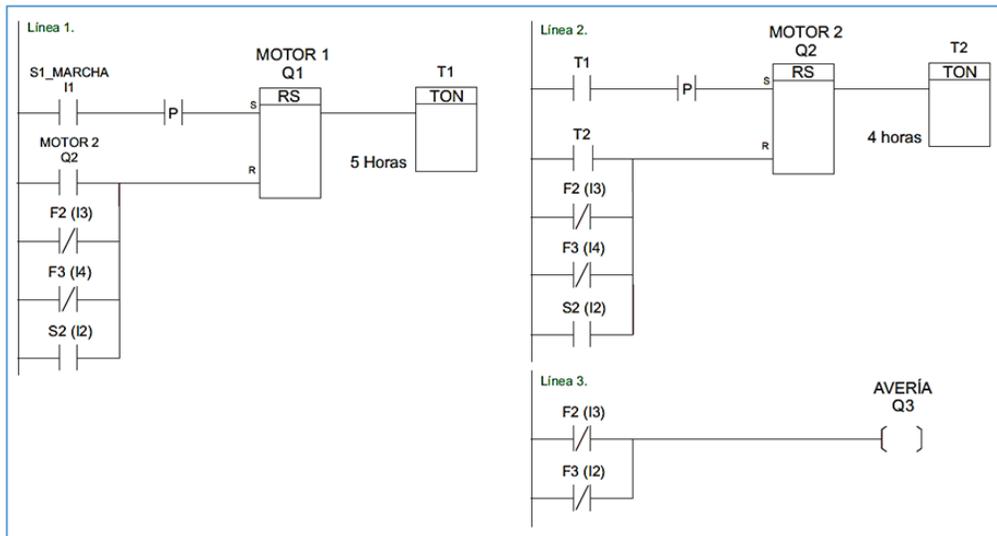


Figura 8 Programa de PLC, secuencia de operación de un proceso automatizado.

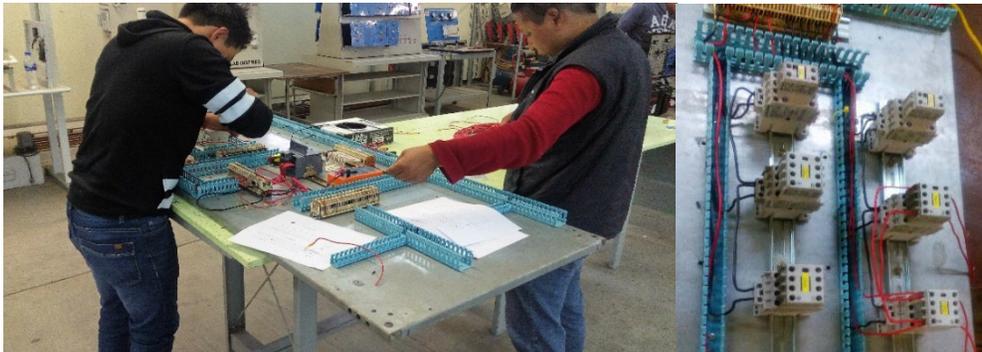


Figura 9 Construcción modular del tablero de control.

La etapa final de este proyecto culmina con la programación de PLC, que convierte una práctica académica en una actividad profesional, que es requerida por el sector industrial. A través del tablero didáctico es posible realizar de manera secuencial una ilimitada reproducción de casos de estudio, que involucren actividades de

operación, alambrado, diagnóstico de fallas, programación y diseño de acciones secuenciales que den solución a un proceso automatizado (figura 10).

Esta etapa final permite la generación del diálogo como elemento que identifica y reafirma el aprendizaje sobre el manejo y operación de los PLC. Para de esta manera comprender como la teoría asociada a un aprendizaje pragmático que se consolida en una competencia laboral, que es capaz de generar como valor agregado el desarrollo de una pertinente capacitación para el trabajo de los recursos humanos de las instituciones productivas.

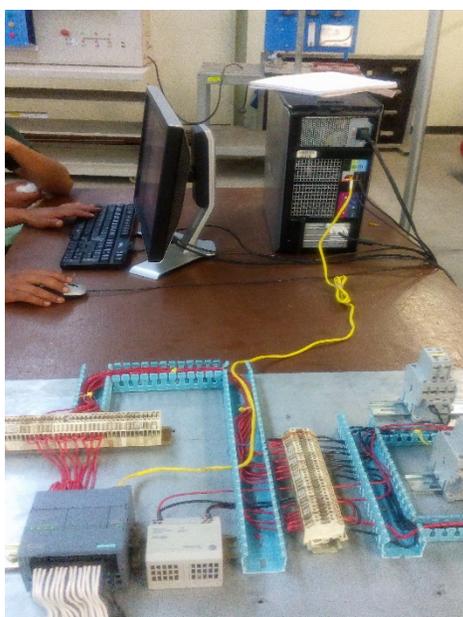


Figura 10 PLC S7-1200, simulación de un proceso productivo automatizado.

## **5. Conclusiones**

La culminación del proyecto se considera positiva puesto que se logró contribuir con una metodología dinámica en la capacitación para el trabajo en PLC's. De igual forma, se diseñó un nuevo prototipo didáctico que permite ser una económica alternativa de equipamiento para las Instituciones de Educación Media Superior (IEMS) e Instituciones de Educación Superior (IES).

Se aconseja continuar con estas aportaciones para los talleres y laboratorios en las IEMS e IES, ya que se aumentan las posibilidades de que los alumnos puedan

interactuar con equipos o procesos que se encontraran más adelante dentro de la industria.

A través de la ocupación de este prototipo didáctico se está ahora en posibilidad de formar profesionistas en programación, instalación y operación de PLC's, que desarrollen tecnología propia a través de la innovación de la maquinaria y equipo de producción existente en el sector laboral.

Un trabajo paralelo fue la recopilación de un manual de prácticas del tablero didáctico para la enseñanza del control por PLC, que permitirá estandarizar las prácticas de enseñanza y mejorar la destreza de los participantes en cada uno de los cursos a impartirse.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] R. Arjona, *Automatismos Industriales*, España: AE, 2013.
- [2] INEGI, «Censos Económicos 2014» 2014 06 2016. [En línea]. Available: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ce/ce2014/>.
- [3] L. G. Benavides Ilizaliturri, *Hacia nuevos paradigmas en educación*, Puebla: CIPAE, 1988.
- [4] J. F. Dulhoste, *TEORIA DE CONTROL*, Mérida: Universidad de los Andes, 2016.
- [5] NEMA, «Programmable-Controllers-Part-1-General-Information,» 26 06 2016. [En línea]. Available: <https://www.nema.org/Standards/Pages/Programmable-Controllers-Part-1-General-Information.aspx>.
- [6] IEC, «IEC» 26 06 2016. [En línea]. Available: <http://www.iec.ch/>.
- [7] AMATROL, «Portable PLC Training System Siemens S7-1200» 26 06 2016. [En línea]. Available: <http://www.amatrol.com/coursepage/990-ps712/>.
- [8] AMATROL, «Portable PLC Training System Siemens S7-1200» 26 06 2016. [En línea]. Available: <http://www.amatrol.com/coursepage/990-ps712/>.
- [9] B. Carrera y C. Mazzarella, «Vygotsky: Enfoque Socicultural» Redalyc, pp. 41-44, 2001.

- [10] C. del Moral Santaella, «Conocimiento Didáctico General Para El Diseño Y Desarrollo De Experiencias» Profesorado. Revista de Currículum y Formación de Profesorado, pp. 421-452, 2012.

# **DISEÑO DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO EMBEBIDO PARA EL MONITOREO LOCAL Y A DISTANCIA DE LOS SIGNOS VITALES DE UN SER HUMANO**

***Luis Eduardo Cárdenas Gaytán***

Departamento de eléctrica-electrónica

Instituto tecnológico de Cd Guzmán

*luiseduardo89@gmail.com*

***Armando García Mendoza***

Departamento de eléctrica-electrónica

Instituto tecnológico de Cd Guzmán

*a\_garmen60@yahoo.com.mx*

## **Resumen**

Los avances médicos en el estudio y monitoreo de algunas enfermedades en los últimos años ha ido creciendo cada día más, esto es gracias a las investigaciones que se hacen a favor de este rubro. En las consultas médicas de rutina el médico lo primero que hace es revisar la presión arterial, ritmo cardiaco, temperatura, pulso, estatura, peso y en algunos casos también un electrocardiograma.

En la actualidad ya no se tiene que esperar mucho tiempo para obtener el resultado de algún estudio, prácticamente se entregan al momento y los procesos son menos invasivos. En el presente artículo se pretende realizar un sistema electrónico embebido capaz de monitorear los signos vitales de una persona, información sumamente importante para el diagnóstico de patologías en un organismo haciendo una revisión de los signos vitales básicos y como se mejora su monitoreo debido a los avances de la tecnológica en ingeniería electrónica y motivada por la investigación en aplicaciones de la salud.

**Palabra(s) Clave(s):** monitoreo, signos vitales, sistema embebido.

## 1. Introducción

Los avances médicos que existen en la actualidad generados gracias al estudio de ciertas enfermedades, ha producido un enorme avance en su monitoreo y su tratamiento, ya que gracias a los nuevos dispositivos médicos que existen, es posible el poder diagnosticar enfermedades que en décadas anteriores hubiese sido imposible de detectar y mucho menos el poder tratar. Tal es el caso de las enfermedades del corazón por ejemplo. Dentro de los signos vitales básicos en el ser humano a los cuales se puede hacer referencia son: temperatura corporal y señales bioeléctricas del corazón (ritmo cardiaco y electrocardiograma), estos son los signos vitales que los médicos utilizan para poder diagnosticar una patología, la cual se manifiesta como un cambio anormal en los signos vitales antes mencionados, ya que con esta información es más evidente notar alguna degeneración en algún sistema, musculo u órgano del cuerpo humano [1, 2, 3, 4].

## 2. Métodos

Los materiales a utilizar dentro del sistema de monitoreo son los siguientes: sensor de temperatura lm35, Sensor de pulsos para tarjeta de desarrollo, electrocardiógrafo ad8232, tarjeta de desarrollo arduino nano, shield para arduino nano y fuente de alimentación. Todos estos serán descritos a continuación.

### Tarjeta de desarrollo arduino nano y shield para arduino nano

El arduino nano (figura 1) es una tarjeta pequeña, completa y fácil de usar basada en el ATmega 328p, el arduino nano puede ser alimentado de diferentes formas: mediante un cable mini USB, una fuente de alimentación no regulada 6-20 V en el pin 30 ó un fuente regula de 5 V en el pin 27 la fuente de alimentación se selecciona automáticamente.



Figura 1 Arduino nano.

Con el shield para el arduino nano (figura 2) vamos a poder hacer las conexiones necesarias de nuestros sensores, ya que el arduino nano no cuenta con los pines adecuados para poder hacer la conexión y con el shield es más fácil porque este cuenta con una serie de bloques t con tornillos opresores los cuales nos van a ayudar a que las conexiones de los sensores no queden flojos.

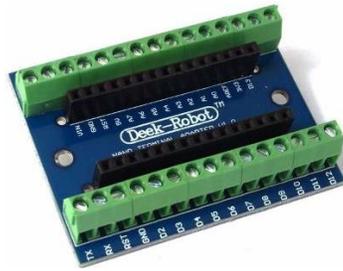


Figura 2 Shield para arduino nano.

### Fuente de alimentación

La fuente de alimentación (figura 3) de los sensores consta de 2 reguladores de voltaje 7805 y un diodo Zener a 3.3 V, uno de los reguladores de voltaje tendrá una salida directa a l sensor de temperatura el cual se alimenta a 5 V; el siguiente regulador lleva un diodo Zener el cual va a realizar la función de regular el voltaje a 3.3 V, voltaje necesario para que nuestros sensores de pulso y electrocardiógrafo trabajen, ya que requieren de este voltaje para su correcto funcionamiento.

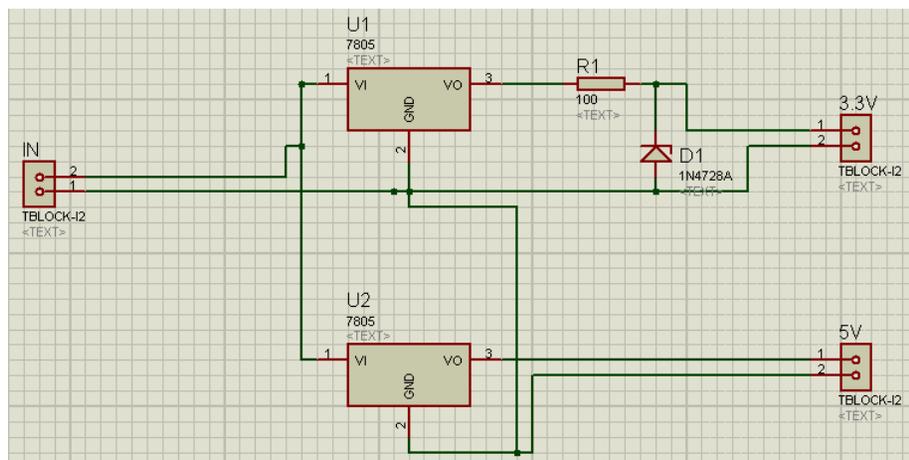


Figura 3 Diagrama esquemático de la fuente.

## Electrocardiógrafo ad8232

El componente principal utilizado en el electrocardiógrafo (figura 4) es el amplificador ad8232 de la compañía *Analog Device*, dicho dispositivo tiene integradas las funciones de: compensación, filtrado y amplificado de la señal adquirida, características necesarias y requeridas al momento de hacer alguna revisión al corazón del paciente, para observar su funcionamiento y corroborar que no exista alguna cardiopatía que pueda afectar a nuestra salud o en caso de existir sea fácilmente detectable.

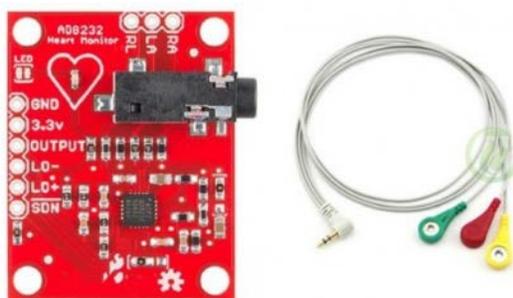


Figura 4 Electrocardiógrafo ad8232.

## Sensor de pulsos

El pulsímetro como el mostrado en la figura 5, utilizado para la medición del pulso está compuesto de un sensor de luz APDS-9008, un amplificador de baja frecuencia y un diodo led, el cual al ser colocado y utilizado en un dedo, el paso de la sangre reduce ligeramente la cantidad de luz siendo este led capaz de traspasar el dedo y este pequeño cambio de luz lo detecta como un pulso, ya que cada cambio de color es el flujo sanguíneo del corazón bombeando sangre y un pulso enviado a la arteria o al musculo. Este sensor tiene una excelente respuesta a los cambios de luz muy cercano al ojo humano, una muy baja sensibilidad a los cambios de luz su rango de temperatura de trabajo es de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $85^{\circ}\text{C}$ .

## Sensor de temperatura

El sensor de temperatura *lm35* de la compañía *National Semiconductor* (figura 6) es una muy buena herramienta para el monitoreo de la temperatura corporal, ya

que en comparación del termómetro de mercurio donde en este último la exactitud de la medición se ve afectada por la agudeza visual del usuario, el sensor lm35 se encuentra directamente calibrado en grados centígrados, su factor de escala es lineal de 10 mV/°C, clasificado para un rango de lectura de -55 °C a 105 °C, es de escaso calentamiento, su rango de trabajo es desde los 4 V a los 30 V, ideal para aplicaciones remotas, situación que facilita el monitoreo remoto de temperatura por medio de dispositivos electrónicos.



Figura 5 Sensor de pulsos.

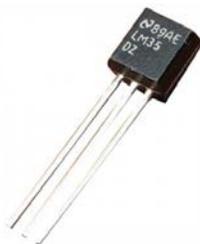


Figura 6 Sensor de temperatura.

### 3. Funcionamiento

El sistema de monitoreo se diseñó en base a la interfaz arduino-labview mediante la cual se utiliza un sketch llamado lifa\_base el cual es el encargado de hacer la conexión de arduino y labview, este sketch es cargado al arduino mediante el IDE del mismo.

Como se muestra en la figura 7 tenemos el diagrama a bloques del sistema en el cual se muestra el shield, el cual sería el encargado de hacer la conexión entre los sensores y la interfaz gráfica. Esta interfaz va hacer la encargada de hacer posible el monitoreo local y a distancia, haciendo todo esto posible gracias a la

herramienta web publishing tool la cual nos va a entregar una dirección IP con la que va a ser posible su acceso a través de internet.

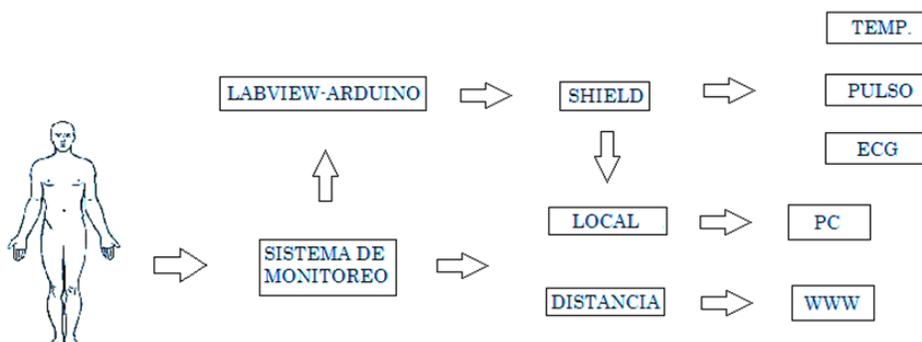


Figura 7 Diagrama a bloques del sistema.

#### 4. Discusión y análisis de resultados

Dentro de los resultados obtenidos que se muestran a continuación, fueron realizados a una persona que no presenta ninguna patología que representara algún riesgo para la persona. El método de análisis con el cual se realiza esta técnica de monitoreo no representa ni representara ningún riesgo para la persona o enfermo al cual se le realice este análisis. A continuación se muestran los resultados por cada tipo de variable utilizada en el monitoreo.

##### Electrocardiograma

En la figura 8 que se muestra a continuación se puede observar la señal bioeléctrica del corazón observándose que en las diferentes partes que lo componen, no se observa alteración alguna pudiéndose notar que no tiene ninguna cardiopatía que represente algún riesgo para la salud del paciente.

##### Temperatura corporal

Se midió la temperatura corporal (figura 9) con el sensor Im35, el cual arroja una temperatura considerada normal de 37.24 grados centígrados, pudiendo observar que la persona se encuentra sana y no presenta ninguna enfermedad ni signo de alarma que pueda ser un factor de riesgo para la salud del paciente.

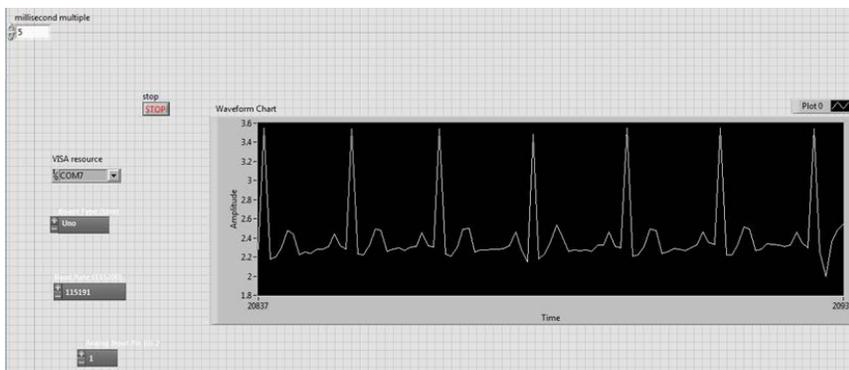


Figura 8 Electrocardiograma.

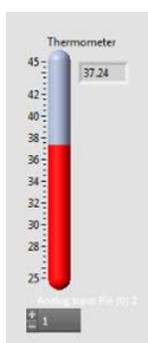


Figura 9 Lectura de temperatura.

## Pulso

En el resultado de la lectura que se realizó se muestra señal constante sin variación en el tiempo o el espacio entre donde empieza y termina el ciclo dando por hecho que no existe alguna arritmia ni bradicardia que nos muestre una afección cardíaca ni alguna patología que afecte al paciente dado que fueron constantes los pulsos (figura 10).



Figura 10 Frecuencia cardíaca.

## 5. Conclusiones

- La implementación de este tipo de sistemas de monitoreo, requiere de conocimientos y habilidades de sobre el comportamiento de los diferentes tipos de sensores.
- La implementación de la interfaz gráfica fue de gran ayuda por sus gráficos y facilidad de sintonización en la computadora.
- La integración de nuevos sistemas para el monitoreo de los signos vitales y señales bioeléctricas del cuerpo humano facilitará el diagnóstico temprano de enfermedades y consecuentemente proponer un tratamiento óptimo impactando en el promedio de vida del ser humano.
- La fusión de estos dispositivos facilita el monitoreo y diagnóstico temprano de varias enfermedades. es recomendable su uso de estos dispositivos en personas que se encuentran limitadas de movimiento ya que esto facilita a los médicos el diagnóstico de los diferentes tipos de patologías y a familiares el poder estar más al pendiente de la persona y poder evitar percances que puedan ser fatales.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] Mackowiak PA. Temperature regulation and the pathogenesis of fever. In: Mandell GL, Bennett JE, Dolin R, eds. Principles and Practice of Infectious Diseases. 7th ed.
- [2] Salud y bienestar (s/d), "las causas de la baja frecuencia del pulso" [en línea] <http://lasaludi.info/la-frecuencia-del-pulso-baja-causa.html>
- [3] Cooper J (1986). "Electrocardiography 100 years ago. Origins, pioneers, and contributors". N Engl J Med 315.
- [4] Harrison Principios de Medicina Interna 16a edición (2006). Harrison online en español. McGraw-Hill.

## **SISTEMA DE SEGURIDAD EN ESTUFAS**

***Arturo Hernández Hernández***

Universidad Politécnica de Querétaro

*arturo.hernandez@upq.mx*

***Sergio Daniel Hernández Miranda***

Universidad Politécnica de Querétaro

*014015174@upq.edu.mx*

***María Blanca Becerra Rodríguez***

Instituto Tecnológico de San Juan del Río

*industrialblanca@gmail.com*

***Fabrizia Celia ArguellesVorrath***

Universidad Politécnica de Querétaro

*014013685@upq.edu.mx*

### **Resumen**

Las estufas son aparatos que desempeñan un papel fundamental en el día a día de todas las familias en el país y en todo el mundo, existen estufas desde las más antiguas como: estufas de leña, estufas a gas, estufas eléctricas. Pero desgraciadamente año con año no siempre hay noticias buenas, pues las notas de accidentes asociados a las distintas maneras de calefacción, que en muchas ocasiones terminan con saldo de personas gravemente heridas o incluso muertas, esto debido al mal uso o descuido que se tienen de las estufas. El hombre para prevenir este tipo de accidentes, ha seguido algunas recomendaciones de seguridad como: revisar con regularidad los calefactores y estufas, las instalaciones eléctricas y de gas, evitar sobrecargar los circuitos eléctricos porque puede favorecer los incendios. Algunos síntomas de más cuidado son: el olor a gas, molestia o ardor de ojos, mareos o problemas para respirar cuando sucede esto se debe apagar la estufa y ventilar el lugar abriendo puertas y ventanas. Este trabajo tiene el propósito de implementar un mecanismo capaz de cortar el gas a

las estufas, cuando se apague la flama durante su uso, buscando evitar la intoxicación y por ende la muerte de las personas.

**Palabra(s) Clave(s):** accidente, estufa, gas.

## **1. Introducción**

El hombre para sobrevivir tuvo que aprender primeramente a cazar que comer y posteriormente a cocinar por necesidad desde la era de piedra no bastaba con saber que comer sino también debía de aprender a cocinar la presa para hacer más nutritiva su comida y así mejorar el sabor de sus alimentos, de ahí que surge la necesidad de crear lo que actualmente se conoce como estufa. Al hombre no le basto tan solo el cocinar sino empezó a idear también como regular el fuego en la estufa y empezó a evolucionar este aparato a través del tiempo. Los componentes principales en evolucionar de las estufas fueron los sistemas de seguridad precisamente por la prevención de accidentes de las personas. Este trabajo se enfocó a un sistema de seguridad en las estufas, el cual se refiere a un dispositivo de seguridad cuya finalidad consiste en evitar el peligro de incendio que existe cuando una estufa de gas vuelca por el motivo que sea, de manera que el dispositivo corta el suministro de gas hacia los quemadores en el momento de producirse dicho vuelco.

Las conocidas estufas de gas de uso doméstico que normalmente son transportables, para lo cual incluyen las correspondientes ruedas, y que presentan un habitáculo para la botella de gas en su parte trasera, así como quemadores en la parte frontal de la estufa.

Estas estufas, cualquiera que sea la causa, pueden volcar estando encendidas, lo cual determina un riesgo de incendio, especialmente si la estufa cae hacia delante, es decir, con los quemadores enfrentados al suelo.

Para lograr los objetivos y evitar los inconvenientes, estos sistemas consisten en un dispositivo de seguridad para estufas de gas, de fácil aplicación y gran efectividad.

Dichos dispositivos están determinados por una pieza que se intercala en el conducto que va de la botella de gas a los quemadores de la estufa. Esta pieza

dispone de una boquilla de entrada de gas y de una boquilla de salida del mismo, estando dichas boquillas comunicadas por un conducto central.

El conducto central presenta un ensanchamiento perimétrico en su parte media que sirve de alojamiento a una bola o cuerpo esférico de menor diámetro que el referido ensanchamiento pero de mayor diámetro que la boquilla de salida de la pieza. El ensanchamiento del conducto de la pieza va perdiendo grosor mediante una rampa o cavidad tronco-cónica que comunica con la boquilla de salida, de manera que cuando la pieza o dispositivo de la invención se encuentra en posición horizontal, la boquilla de entrada y la de salida se encuentran comunicadas permitiendo el paso del gas, mientras que si la referida pieza se encuentra en posición vertical, la bola o cuerpo esférico cae en la cavidad tronco-cónica obturando la boquilla de salida y por lo tanto impidiendo el paso del gas. Así, cuando la estufa se encuentra en su posición vertical de uso, el dispositivo está en disposición horizontal permitiendo el paso del gas hacia los quemadores, mientras que si la estufa cae hacia delante el dispositivo queda en posición vertical y se produce el corte del suministro del gas. Esta caída hacia delante de la estufa es la que se produce con mayor facilidad y la que presenta mayor peligro, por lo que el dispositivo descrito es suficiente en la aplicación más habitual. No obstante, se ha previsto la posibilidad de cortar el suministro de gas ante cualquier tipo de caída, para lo cual hay que conectar en serie cuatro piezas como la descrita y orientadas en los cuatro sentidos posibles de caída, es decir, hacia delante, hacia atrás y hacia los dos laterales. También es posible realizar el dispositivo con dos cavidades tronco-cónicas, una en la parte delantera comunicada con la boquilla de entrada, con lo que dos de estos dispositivos orientados perpendicularmente entre sí y conectados en serie cubrirán los cuatro sentidos posibles de caída, aunque en este caso el dispositivo tiene que constar de dos piezas acopladas para poder introducir la bola o cuerpo esférico de su interior.

Este trabajo soluciono una necesidad creada por el hombre basándose en antecedentes de sistemas de seguridad en estufas y sus principios para poder innovar y mejorar la calidad de lo que ya fue inventado.

## 2. Desarrollo

Debido a los múltiples accidentes que pasan en los hogares, por descuidos y entre los principales se encuentran las muertes por intoxicación con dióxido de carbono ya que regularmente las personas dejan calentando en la estufa algunos alimentos pero debido a diferentes circunstancias la flama se apaga sin tener ningún medio de seguridad que ayude a reducir este tipo de riesgos, dada las circunstancias de riesgo surgió la necesidad de abordar en este trabajo un mecanismo de seguridad que ayude a evitar los accidentes comentados con anterioridad.

### Válvula de apertura y cierre para el paso de gas

En este trabajo la válvula que se utilizo fue la “Esfera soldar de baja presión”. (figura 1).



Figura 1 Válvula  $\frac{3}{4}$ ".

Este tipo de válvula se utilizó principalmente porque su funcionamiento es de los más comunes o más conocidos, además de ser el sistema que la mayoría de las estufas maneja, también porque facilita la realización de las pruebas por ser la más práctica y factible de conseguir.

Además se le conoce a esta válvula como válvula de alivio de seguridad, por el alivio de presión o de seguridad de presión. Como su nombre lo indica, esta válvula además de ser muy empleada, asegura una resistencia a la presión y de alta seguridad. Trabajar con gas es un tema complejo, por lo que se buscó materiales y elementos que pudieron resistir y reducir cualquier falla y error en estos.

Se puede definir como un dispositivo que automáticamente sin otra asistencia de energía que la del propio fluido implicado, descarga fluido para evitar que se

exceda una presión predeterminada y que fue diseñada para que vuelva a cerrar y se evite el flujo adicional de fluido después de haberse restablecido las condiciones normales de presión.

Esta válvula fue ideal para acoplarse en todo tipo de estufas y así poder obtener la solución a un problema de la vida real en los hogares [1].

## Termopar J

El termopar industrial ha utilizado fue de tipo J, que está hecho de hierro, con el cual al ver sus especificaciones de rango de temperatura de  $-270^{\circ}$  a  $1200^{\circ}\text{C}$ , se pudo ver que es recomendable para el tipo de atmosfera que se necesita, la cual es un tanto variante por el constante uso de fuego y aparatos electrónicos. Su principal inconveniente fue la rápida oxidación que sufre si se excede de  $550^{\circ}\text{C}$ , lo cual no es problema para el trabajo desarrollado para este sistema de seguridad pues no se espera llegar a tales temperaturas [2] (figura 2).

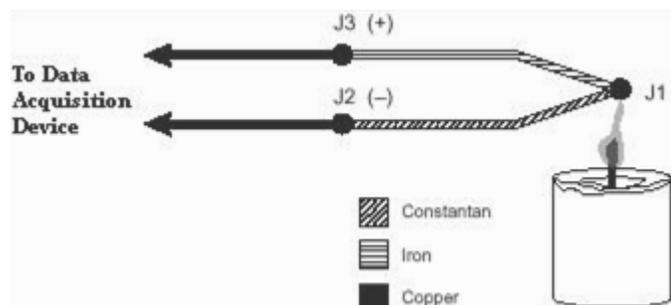


Figura 2 Termopar tipo J.

## Selección del motor

La selección del motor utilizado fue uno de los retos más grandes que presento este proyecto, pues en base a la corriente que este produjo y consumió, se realizaron todos los cálculos previos y posteriores para que el circuito funcionará adecuadamente.

El motor que se utilizó fue de un motor eleva vidrios de 12 Volts. Es un motor de corriente continua con reductor de 12 V y 95 revoluciones por minuto (rpm), con un torque nominal de 9,5 kg-cm y 30 kg-cm a máxima eficiencia. Este motor de

media velocidad destacado por su reducido consumo y buen funcionamiento. Especialmente indicado para aplicaciones que requieren una velocidad y potencia media [3] (figura 3).



Figura 3 Motor 12 V.

Este motor se utilizó durante el primer ciclo de la carrera de mecatrónica y es con el que más sea familiarizado para las prácticas que se realizaron además de tener un buen funcionamiento, muestra una estructura excelente y los rangos de velocidad tan aptos al desarrollo de este trabajo.

Para el diseño de este sistema de seguridad, es importante mencionar que se necesitó integrar un motor que regule y trabaje adecuadamente con la corriente monofásica, que comúnmente se encuentra en los hogares y soporta 220 V.

### **Etapa de potencia**

A continuación se mostrará la simulación del circuito de la etapa de potencia (figura 4).

Se elaboró el diseño y construcción de la etapa de potencia la cual consistió en realizar por medio de un software (LiveWire) el diseño funcional, donde se mostró como debe de ir conectado el circuito de tal manera que logre hacer girar el motor a tiempo, con la interfaz de la programación. En esta etapa se realizaron varias pruebas que se describirán más adelante, ya existían variables, buscando reducir el error se utilizando un promedio y poder tener un rango.

El circuito de potencia real quedo de la siguiente manera (figura 5).

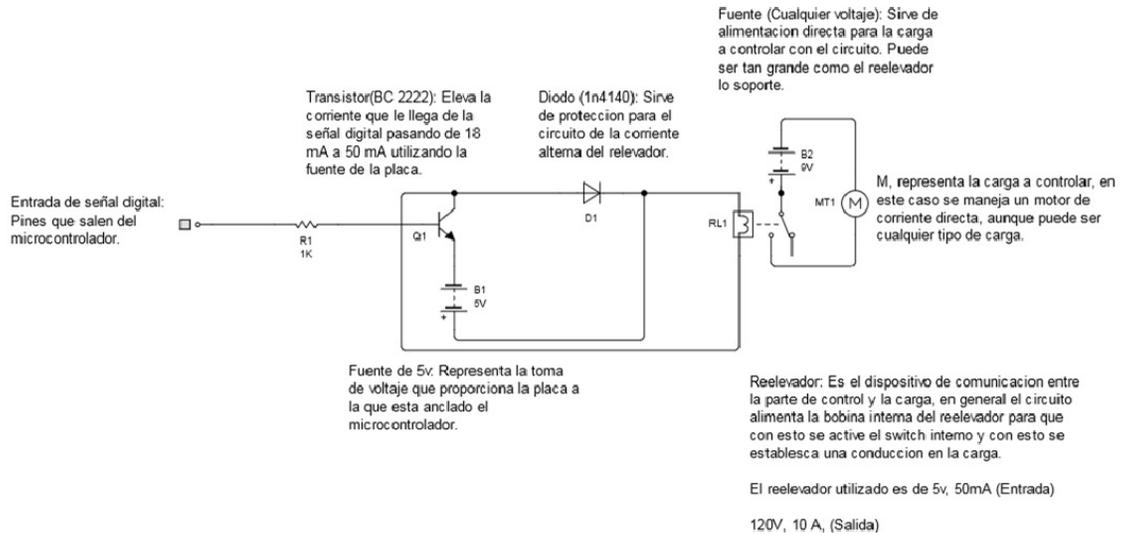


Figura 4 Etapa de Potencia Circuito.

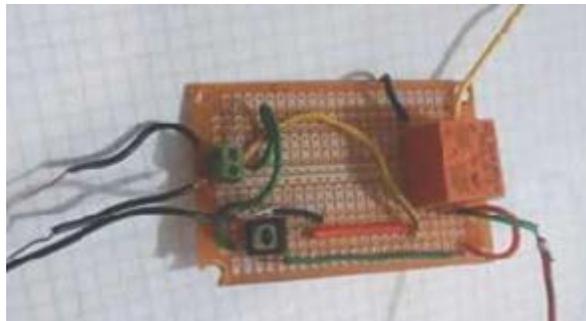


Figura 5 Etapa de potencia construida.

## El diseño de programación en periféricos (ARDUINO)

El diseño de la programación se realizó en Arduino, ya que es una herramienta fácil de manejar y que es muy conocida en el medio profesional, fácil de implementar y de conectar a los diferentes tipos de circuitos. La parte de programación en este trabajo consistió en determinar la temperatura con la que se trabajó, el tiempo de cambio y el movimiento del motor para que de esta forma se pudiera conectar todo el circuito y hacerlo funcionar (figura 6).

## Diseño en SolidWorks

El diseño se realizó en SolidWorks, fue la creación de la estufa y se simuló todo el sistema de potencia y conexión dentro de la caja lateral como se muestra (figura 7).



Figura 6 Conexión con sensor de temperatura.



Figura 7 Vista de la estufa.

### **Pruebas de funcionamiento del sistema**

Las pruebas se llevaron a cabo desde el hogar, ya que al tratar el tema del gas es un elemento difícil de manejar y conseguir ya que puede ser peligroso. Para poder establecer un parámetro de cambio de temperatura se realizaron muestreos a diferentes horas del día y con diferentes condiciones ambientales. Para decretar el cambio de temperatura y poder mandar una señal para el cierre de la válvula, se modeló una ecuación diferencial de primer orden en la que se estableció la temperatura mínima obtenida de los muestreos antes realizados y la variación que existe en un periodo de 10 segundos.

Las pruebas de funcionamiento tuvieron una larga duración, debido a la temperatura, así como el factor de temperatura ambiente el cual no se puede controlar.

Basados en la Ley de enfriamiento de Newton, ecuación 1.

$$\frac{dT}{dt} = k(T - T_m) \quad (1)$$

Donde  $T_m$  = Temperatura Ambiente

$$\int \frac{dT}{(T - T_m)} = k \int dt \quad (2)$$

$$\ln(T - T_m) = kt + C \quad (3)$$

$$T(t) = Ce^{kt} + T_m \quad (4)$$

Aplicando las condiciones iniciales:

$$T(0) = 130^\circ\text{C}$$

$$T_m = 18.6^\circ\text{C}$$

$$130 = Ce^{k0} + 18.6$$

$$C = 130 - 18.6$$

$$C = 111.4$$

$$T\left(\frac{1}{6}\right) = 103^\circ\text{C}$$

$$(1/6=10\text{segundos})$$

$$103 = (111.4) \left( e^{\frac{k}{6}} \right) + (18.6)$$

$$\frac{103 - 18.6}{111.4} = e^{\frac{k}{6}}$$

$$k = \ln\left(\frac{422}{557}\right)(6)$$

$$k = -1.66536$$

Así se obtiene la solución particular

$$T(t) = 111.4(e^{-1.66536t}) + 18.6$$

El tiempo dada una temperatura por el sistema propuesto se modelo con esta ecuación. Ahora:

$$T(t) = 111.4(e^{-1.66536t}) + 18.6$$

$$\frac{T(t) - 18.6}{111.4} = (e^{-1.66536t})$$

$$\ln\left(\frac{T(t) - 18.6}{111.4}\right) = -1.66536t$$

$$t = \frac{\ln\left(\frac{T(t) - 18.6}{111.4}\right)}{-1.66536}$$

El tiempo dada una temperatura por el sistema propuesto se modelo con esta ecuación.

Es importante hacer mención de que las pruebas realizadas para generar las ecuaciones, se realizaron directo en una estufa. Es importante mencionar que se necesita conocer el torque del motor, para determinar si este es suficiente para poder cerrar la válvula:

- Como se sabe el Torque o par motor, es el nombre que se da a las fuerzas de torsión de un motor.

- El torque es la capacidad de desarrollar fuerza sobre un eje, es decir, es la fuerza que ejerce sobre algo que gire o sobre algo para hacerlo girar.

¿Por qué calcular potencia?

Porque la relación entre TORQUE y POTENCIA está en la velocidad angular de aquello en donde se considere el análisis.

Si es en el eje del motor será:

$$\dot{W} = M \omega$$

Siendo:

$\dot{W}$  = Potencia

$M$  = momento de fuerza o torque

$\omega$  = velocidad angular =  $\pi n/30$

Se sabe que la potencia es el resultado del producto entre el voltaje y la corriente.

Por lo tanto se obtienen datos del motor.

Voltaje= 12 V

Corriente=1.4 A

$$\dot{W} = V * I$$

Ec. (5)

$$\dot{W} = 12 V * 1.4A$$

$$\dot{W} = 16.8 W * \left(\frac{1 hp}{745.699872 W}\right)$$

$$\dot{W} = 0.0225229 hp$$

Una vez conocida la potencia del motor se prosiguió a calcular el torque de este.

Recordar:

$$\Theta_{\text{motor}} = 95 \text{ rpm} = 95(2\pi)/60 = 9.9484 \text{ rad/s}$$

$$M = \frac{\dot{W}}{\omega} \quad (6)$$

$$M = 2.2669 \times 10^{-3} N.m$$

Este es el torque que genera el motor, ahora para saber si es suficiente para que haga girar la válvula, necesita ver las especificaciones de la válvula y ver si el torque es suficiente.

### 3. Resultados

Los resultados obtenidos en el desarrollo del sistema de seguridad para uso eficiente y eficaz en estufas fueron prometedores, satisfactorios y cumplieron con todas las expectativas que se esperaban.

Se obtuvieron resultados positivos en la parte de programación de periféricos, en donde se implementó correctamente lo aprendido sobre Arduino, en electrónica de potencia en donde se implementó de manera correcta en los términos técnicos y se puso en práctica la simulación hasta contrastar con lo real. Este fue el principal reto a vencer y logro, ya que como su nombre lo indica va a ser el potencial y base de todo el desarrollo. En cuanto a los cálculos, se implementaron ecuaciones diferenciales en donde por medio de ecuaciones de primer orden separables se pudo conocer el comportamiento de la temperatura.

Como resultado del sistema de seguridad en base a ecuaciones diferenciales se encontró que la temperatura en cierto tiempo por el sistema propuesto y se modeló con la siguiente ecuación:

$$T(t) = 111.4(e^{-1.66536t}) + 18.6$$

Así mismo el tiempo dada por la temperatura del sistema de seguridad fue modelado por la ecuación:

$$t = \frac{\ln\left(\frac{T(t) - 18.6}{111.4}\right)}{-1.66536}$$

Esto con base a los resultados obtenidos de cambio de temperatura (27 °C en 10 s) al extinguirse la llama. En general los resultados obtenidos fueron satisfactorios.

### 4. Discusión

Existen sistemas de seguridad en estufas, pero el costo de los mismos es muy excesivo, algunos sistemas que detectan dióxido de carbono, necesitan alguna concentración considerable del mismo, para activar el cierre del suministro de gas. Este dispositivo de seguridad resulta muy eficiente debido a que sin importar la temperatura existente en el ambiente, el sistema realiza una comparación entre la

posición de la perilla y la temperatura del exterior, haciendo así en caso de ser necesario mandar una señal a un control, para activar el motor y este realice el cierre de la válvula de seguridad, que corta el suministro de gas a la estufa, lo que lo vuelve un sistema práctico y económico.

## **5. Conclusiones**

Después del análisis, desarrollo, etapas de prueba y funcionamiento se llegó a la conclusión de que el proyecto llamado “Sistema de seguridad en estufas” cumplió con su objetivo de cortar el flujo de gas a través de una válvula situada en la toma principal del fluido de la estufa, la cual consistía en detectar temperaturas menores a la temperatura de trabajo de acuerdo a la posición de la perilla de encendido, para evitar fuga, desperdicio o intoxicación.

Desde un principio, se pensó que era un proyecto difícil de realizar, ya que trabajar con gas no es sencillo, existieron muchas complicaciones pues para las medidas y pruebas se tuvo que interactuar entre la estufa y el sensor de temperatura. Fue un reto mezclar cálculos de dos fuentes diferentes, así como las variaciones de la temperatura en el ambiente, para lograr que con ambas funcionaran a la perfección, pero se logró el objetivo.

## **6. Referencias**

- [1] Home Depot. (2012). Valvulas. 2014, de home depot. Sitio web: <http://www.homedepot.com.mx/comprar/es/coapa-del-hueso/valvula-esfera-soldar-baja-presion-3-4>
- [2] OMEGA (2006). Sensor termopar. 2010, de Omega global Sitio:<http://es.omega.com/prodinfo/termopares.html>
- [3] Super robotica. (2002). Motores funcionales. 2015, de Robotica avanzada Sitio web: <http://www.superrobotica.com/motores.htm>

# **SISTEMA DE MONITOREO EN TIEMPO REAL BASADO EN FPGA PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN**

***Edson Eduardo Cruz Miguel***

Universidad Autónoma de Querétaro, cerro de las campanas s/n 76010, teléfono  
*ecruz30@alumnos.uaq.mx*

***Juvenal Rodríguez Reséndiz***

Universidad Autónoma de Querétaro, cerro de las campanas s/n 76010, teléfono  
*juvenal@uaq.edu.mx*

## **Resumen**

El presente artículo muestra el diseño de un sistema de monitoreo de energía eléctrica empleando una interfaz gráfica en LabVIEW. El sistema sensa las señales de tensión y corriente eléctrica por medio de una etapa de adquisición basada en un FPGA de la familia SPARTAN 6 de XILINX, una vez adquiridos los datos, se realiza dentro del FPGA el cálculo de valores RMS. Posteriormente los datos adquiridos son enviados a la PC a través de una comunicación RS-232 implementada en el FPGA. En LabVIEW se muestra los valores RMS de voltaje y corriente y las gráficas de ambas señales, así como las potencias activas, reactiva y aparente.

**Palabra(s) Clave(s):** FPGA, LabVIEW, monitoreo en tiempo real, RMS, VHDL.

## **1. Introducción**

La medición de variables eléctricas tanto en una residencia o en la industria es importante debido a que no es posible realizar un almacenamiento de los datos por lo que es indispensable tener una medición exacta de estos consumos.

En la actualidad los sistemas embebidos forman parte fundamental tanto de dispositivos industriales como comerciales, debido a sus múltiples aplicaciones y

ofrecen ventajas tales como disminución del costo y tamaño, el aumento de la velocidad, fiabilidad y flexibilidad, alto rendimiento, por mencionar algunos [1].

Los FPGA (Arreglo de Compuertas de Campo Programable) son dispositivos que permiten el desarrollo de hardware y realizar operaciones de forma paralela, lo que ofrece alta velocidad y flexibilidad para aplicaciones de procesamiento de señales [2]. Por estas razones se pretende fomentar el uso de la tecnología FPGA para el desarrollo tecnológico y la investigación.

El diseño del sistema está estructurado como se muestra en la figura 1. Primero se realiza la detección de las señales de voltaje y corriente de un sistema eléctrico monofásico. En seguida se realiza el acoplamiento de las señales a niveles de 0 a 3.3 Vcc, de acuerdo a las características del ADC (Convertidor Analógico-Digital). El FPGA tiene el control de la comunicación del ADC por medio de un protocolo SPI (Serial Peripheral Interface) y la transmisión de los datos hacia la PC, además de la implementación del cálculo de valores RMS (raíz media cuadrática) de las señales. Finalmente las señales y variables eléctricas como valores RMS, potencias activas, reactivas y aparentes son mostradas en la interfaz desarrollada en LabVIEW. A continuación se describen cada una de las secciones mostradas en la figura 1, que se desarrollaron para el diseño del sistema de monitoreo en tiempo real basado en un FPGA.

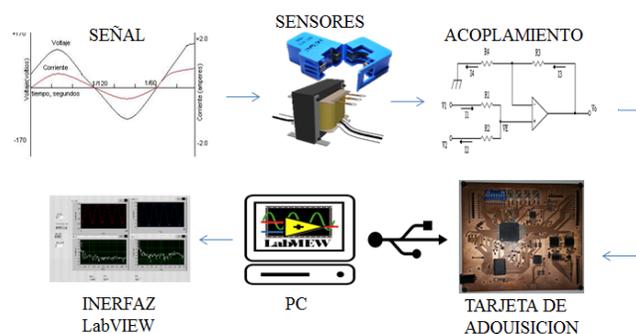


Figura 1 Etapas principales del monitoreo en tiempo real.

Dentro del procesamiento digital de señales es importante conocer las diferentes formas de procesar señales eléctricas de potencia, su análisis e interpretación y conocer conceptos como valores RMS, potencia activa, reactiva y aparente.

El valor eficaz o RMS de una señal de voltaje o corriente es el valor efectivo de una fuente al suministrar potencia, es decir, el valor RMS de una corriente alterna es capaz de producir el mismo trabajo que su valor en corriente continua. En la ecuación (1) se muestra como realizar el cálculo del valor RMS de una señal  $f(t)$ .

$$F_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt} \quad (1)$$

Donde  $F$  es el valor RMS de la señal  $f(t)$  y  $T$  es el periodo de la señal. Para una señal digitalizada el valor RMS de voltaje  $v[n]$  y corriente  $i[n]$  se obtienen a partir de (2) y (3). Donde  $N$  es el número de muestras obtenidas de la señal [3].

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v^2[n]} \quad (2)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i^2[n]} \quad (3)$$

La potencia aparente  $S$  es la potencia total consumida por la carga y es el producto de los valores eficaces de voltaje y corriente como en (4).

$$S = V_{RMS} I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v^2[n]} \cdot \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i^2[n]} \quad (4)$$

La potencia activa  $P$  es la potencia capaz de transformar la energía eléctrica en trabajo. Por lo tanto es la potencia real consumida por los circuitos y se obtiene a partir de (5). Donde  $fp$  es el factor de potencia y depende del desfase entre las señales de voltaje y corriente [3, 4].

$$P = S \cdot fp \quad (5)$$

La potencia reactiva  $Q$  es aquella que no puede convertirse en trabajo y se disipa en las cargas reactivas como motores o inductores [3,4]. Es obtenida a partir de (6).

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (6)$$

## 2. Desarrollo

Para esta aplicación se requieren diferentes etapas como se muestra en la figura 1. La etapa de adquisición de las señales de la línea de transmisión. La etapa de acoplamiento de la señal. La parte de adquisición mediante un ADC, la etapa de procesamiento, almacenamiento, la etapa de transmisión de los datos hacia la PC y por último la interfaz visual en la misma.

En primera instancia, es necesario seleccionar una plataforma que presente versatilidad para la implementación de interfaces de comunicación y procesamiento de datos que represente un costo accesible. Por esta razón se seleccionó una plataforma basada en un FPGA SPARTAN 6 XC6SLX.

Basándonos en la necesidad de la aplicación, la tarjeta que se desarrolló cuenta con un puerto RS-232 para la comunicación serial con la PC, convertidores ADC y DAC (Convertidor digital-analógico) para la adquisición de los datos, memoria SRAM para el almacenamiento de los datos; además, dispone de puertos de entrada y salida para diferentes aplicaciones. En este caso, se usa el manejo de una LCD (Liquid Crystal Display). Así mismo cuenta con botones y switches para el control de aplicaciones.

Para la adquisición de la señal se seleccionó un transformador de tensión eléctrica para aislar y disminuir la amplitud de la señal y un sensor de corriente no invasivo que se muestra en la figura 2. El transformador de corriente escala la corriente del devanado primario a una más pequeña en el secundario [4]. El sensor de corriente genera una salida de  $0-1 V_{cc}$  para una corriente de entrada de  $0-30 A_c$ .



Figura 2 Sensor de corriente alterna no invasivo que mide intensidades de hasta 30Ac.

Para la digitalización de las señales analógicas se seleccionó un convertidor ADS7844, el cual tiene una resolución de 12 bits, un tiempo de muestreo de hasta 250 ksp/s, entrada simple o diferencial de 2.7-5 Vcc y cuenta con una interfaz de comunicación SPI.

Debido a que la señal que se requiere medir es de naturaleza alterna y nuestro ADC tiene una entrada en el rango de 0-3.3 Vcc, se requiere un previo acondicionamiento de la señal para subirla y convertirla en una de corriente continua, de esta manera obtener una señal de 0V a 3.3 Vcc como en [5].

El acondicionamiento de una señal consiste en la manipulación eléctrica de dicha señal, con los dispositivos adecuados con la finalidad de obtener los rangos de voltaje o corriente necesarios para las características del diseño [6, 7].

En la figura 3 se muestra la propuesta para el acoplamiento de la señal a monitorear.

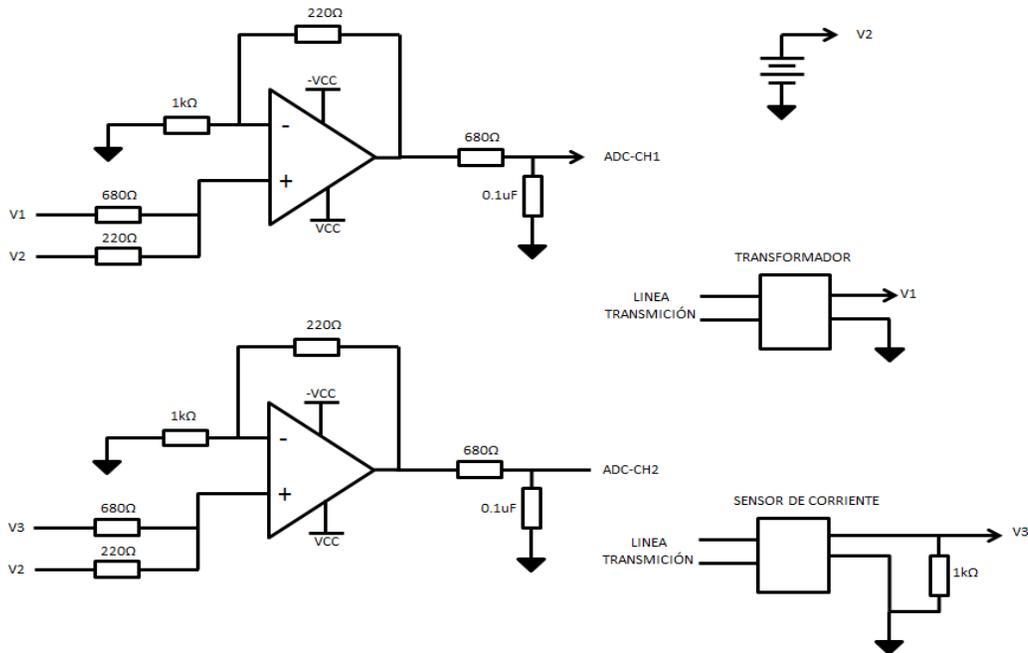


Figura 3 Acondicionamiento de la señal a monitorear.

La señal a monitorear tiene un voltaje pico de 180 V con una frecuencia de 60 Hz, el primer problema radica en el nivel de tensión, por lo que se propone un

transformador a 6 V, que a su vez nos permite aislar la parte de acoplamiento. También se propone utilizar un sensor de corriente no invasivo que nos permite medir hasta 30 A sin tener contacto con la línea, este sensor es básicamente un transformador de corriente. Ahora a la salida de los transformadores tenemos la señal a niveles controlables, pero aún con niveles negativos de tensión. Por lo que se propone utilizar amplificadores operacionales con una configuración sumador no inversor que permita, por una parte disminuir los niveles de tensión y a su vez montarlos en una componente de corriente directa para obtener los niveles requeridos para el ADC. Las ecuaciones (7), (8) y (9) son referentes al modelo de la configuración sumador no inversor de la figura 4.

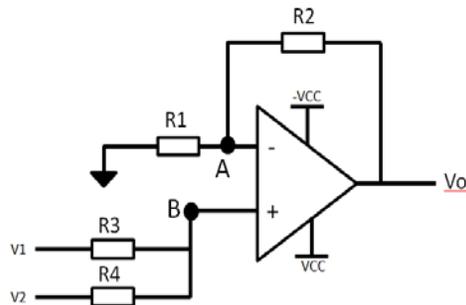


Figura 4 Sumador no inversor.

Aplicando el análisis para amplificadores operacionales se tiene que en el nodo A y B de la figura 4 la tensión eléctrica es igual; aplicando el teorema de superposición se obtienen ecuaciones 7, 8 y 9.

$$V_o \frac{R1}{R1 + R2} = V_A \quad (7)$$

$$\frac{V1 - V_B}{R3} = \frac{V_B - V2}{R4} \quad (8)$$

$$V_B = \frac{V1 \cdot R4 + V2 \cdot R3}{R3 + R4} \quad (9)$$

Haciendo  $V_A = V_B$ , se obtiene (10).

$$V_o = \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} \cdot \frac{V_1 \cdot R_4 + V_2 \cdot R_3}{R_1} \quad (10)$$

Si se conoce las entradas de tensión eléctrica se puede proponer los valores de resistencias para obtener la respuesta requerida por las características del sistema. Los valores de resistores obtenidos son:  $R_1=1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2=220 \text{ }\Omega$ ,  $R_3=680 \text{ }\Omega$ ,  $R_4=270 \text{ }\Omega$  aplicando un offset de 2 V.

La tarjeta de adquisición, de datos basada en un FPGA, se desarrolló en Altium. En la figura 5 se muestra la tarjeta maquinada (parte superior) y una vista desde el software Altium (parte inferior).

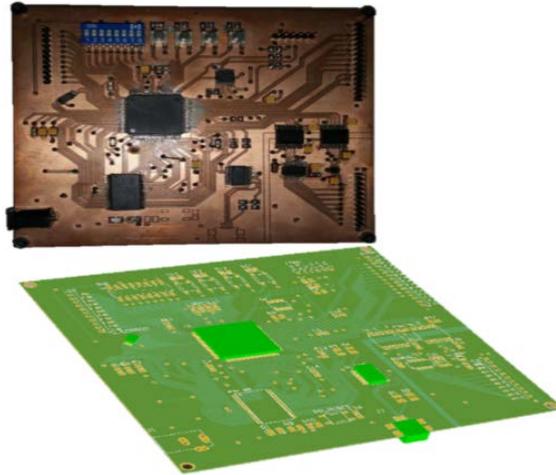


Figura 5 Tarjeta de adquisición desarrollada en Altium.

La tarjeta cuenta con una memoria SRAM 256 Kx16, un puerto RS-232, 1 ADS7844 y un DAC121S, 2 aisladores uno para cada convertidor. Un Puerto para LCD, 8 switches, 4 botones, 20 pines de entrada y/o salida de propósito general con un reloj maestro de 50 MHz.

En la figura 6 se muestra un diagrama de la implementación para el FPGA del sistema de monitoreo en tiempo real. Se realiza la parte del control de la comunicación entre el FPGA y el ADS7844 por medio de un protocolo SPI, además de la interfaz UART para comunicación con la PC y el driver para desplegar los valores RMS en la LCD.

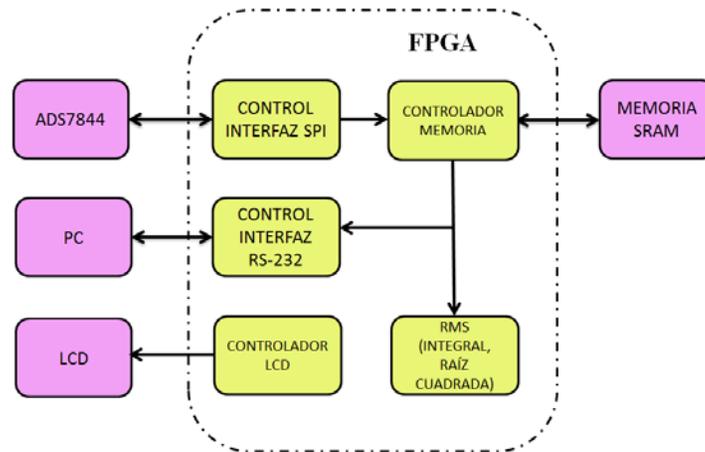


Figura 6 Metodología implementada para sistema de monitoreo en tiempo real.

El ADC adquiere las señales de voltaje y corriente a un periodo de muestreo de 200 us con una ventana de 813 muestras, estos datos son almacenados en la memoria SRAM y enviados a la computadora por el puerto serial para realizar un análisis de los mismos. Una vez que se tienen almacenados los datos se procede a realizar el cálculo del valor RMS de cada señal.

Este cálculo se implementa por medio de dos bloques principales, una unidad MAC (Unidad Multiplicadora Acumuladora) como se muestra en la figura 7, para realizar el producto de vectores [8]. Y el cálculo de la raíz cuadrada usando la propuesta en [7].

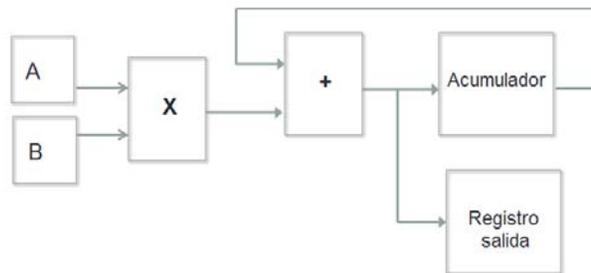


Figura 7 Unidad MAC implementada en FPGA.

De acuerdo con (2) la sumatoria de la señal de voltaje al cuadrado se soluciona por medio de una unidad MAC de  $N$  iteraciones que tiene como entrada el mismo vector de la señal de voltaje que viene del ADC. Entonces, a la entrada se tiene un

formato de punto fijo de 1.12 x 1.12, para a la salida obtener un formato 1.12. Este resultado es multiplicado por una ganancia para obtener la magnitud de la señal original. El cálculo de la raíz cuadrada se realiza a través de un registro de aproximaciones sucesivas (SAR). En este método el resultado es calculado secuencialmente, resultando un dígito en cada iteración [7, 9, 10]. Para esto, se inicia con la ecuación 11.

$$y = \sqrt{x} \quad (11)$$

Si se eleva al cuadrado ambos términos, se obtiene ecuación 12.

$$y^2 = x \quad (12)$$

Posteriormente, se asigna un valor a la variable  $y$ , el cual va cambiando en cada iteración hasta que el resultado sea muy cercano al valor de  $x$ .

El primer paso es inicializar la variable  $y$  con un 1 en el bit más significativo, a continuación, se multiplica por sí mismo la variable  $y$  y se observa el valor de  $x$ . En la figura 8 se muestra un diagrama a bloques del SAR, propuesto por [7].

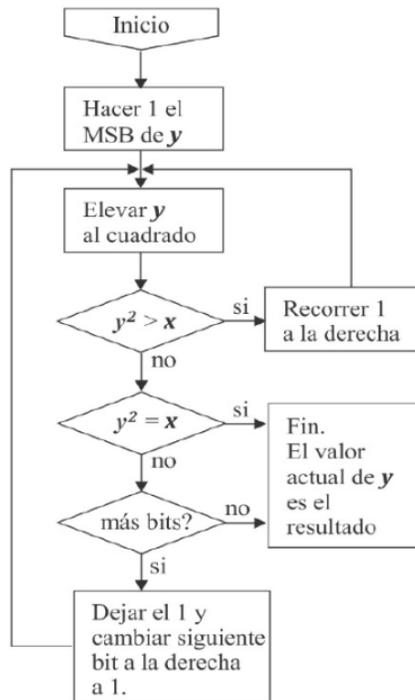


Figura 8 Registro SAR propuesto por [7].

### 3. Resultados

Los resultados obtenidos se muestran en una interfaz en LabVIEW dónde se despliega el factor de potencia, potencias activa, reactiva y aparente, así como los valores RMS de voltaje y corriente. En la figura 9 se muestra la interfaz realizada en LabVIEW con los resultados obtenidos.

Los valores RMS de las señales de voltaje y corriente obtenidos a través del procesamiento en el FPGA fueron de 127.68 V y 4.18 A de alterna, respectivamente, por lo que se observa que los valores RMS obtenidos con FPGA son muy parecidos a los calculados por LabVIEW.



Figure 9 Resultados desplegados en la interfaz LabVIEW.

### 4. Discusión

Éste proyecto, de arquitectura abierta y de bajo costo, muestra que la aplicación podría ser adaptada adaptadas para sistemas eléctricos de 3 hilos, como el trabajo realizado por [6]; en el cual se presenta el uso de un microcontrolador TMS320F28335 para monitorear la energía eléctrica de 3 hilos a baja tensión.

En el presente trabajo, se demuestra que un FPGA es una herramienta viable para el cálculo para cargas resistivas y los resultados fueron mostrados gráficamente en donde se observa que las señales de tensión y corriente de la línea no existe desfase, por lo que el factor de potencia es aproximadamente igual a 1.

## 5. Conclusiones

En el presente trabajo de investigación, se utiliza un FPGA para la medición de variables eléctricas en sistemas monofásicos de baja tensión y se hace el cálculo de valores RMS y factor de potencia con el método SAR. Se demuestra que la tarjeta que se diseñó basada en FPGA es capaz de competir con sistemas de medición de calidad de la energía comerciales. Ya que el sistema construido es basado en un FPGA, se puede decir que es de arquitectura abierta y de bajo costo. Debido a los resultados, este trabajo propone el desarrollo de una plataforma de monitoreo a bajo costo que puede ser usada como plataforma educativa de los estudiantes y fomentar el uso de la tecnología FPGA. Para trabajo a futuro, se contempla que el sistema monitoreará para un sistema de baja tensión a más hilos.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] G. S. Gawande and K. B. Khanchandani, "Efficient Design and FPGA Implementation of Digital Filter for Audio Application," 2015 Int. Conf. Comput. Commun. Control Autom., pp. 906–910, 2015.
- [2] S. Bhattacharjee, S. Sil, and A. Chakrabarti, "Evaluation of Power Efficient FIR Filter for FPGA based DSP Applications," *Procedia Technol.*, vol. 10, pp. 856–865, 2013.
- [3] CHAPMAN, Stephen J.; ROZO CASTILLO, E. Máquinas eléctricas. 2000.
- [4] M. Trejo-Perea, G. Herrera-Ruiz, D. Vargas-Vázquez, R. Luna-Rubio, and G. J. Rios-Mo-reno, "System Electrical Power Monitoring Manifold Based on Software Development and an Embedded System for Intelligent Buildings," *J. Energy*, vol. 137, no. March, pp. 1–10, 2011.
- [5] M. A. R. Guerrero Rodríguez, "Evaluación de los parámetros de desempeño de un convertidor analógico – digital utilizando técnicas de procesamiento digital de señales," p. 123, 2012.
- [6] HADJIDEMETRIOU, Lenos, et al. Low-cost real-time monitoring of a laboratory scale power system. En 2016 18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON). IEEE, 2016. p. 1-6.

- [7] Rodriguez-Resendiz, J., Herrera-Ruiz, G., Rivas-Araiza, E.A.: Adjustable speed drive project for teaching a servo systems course laboratory. *IEEE Trans. Educ.* 54, 657–666 (2011).
- [8] Troncoso, René de F. Romero. *Electrónica digital y lógica programable*. Universidad de Guanajuato (2007).
- [9] E. Styvaktakis, “Automatic classification of power system events using RMS voltage measurements,” *Power Eng. Soc. Summer Meet.* 2002, pp. 824–829, 2002.
- [10] T. Sutikno, A. Z. Jidin, A. Jidin, N. Rumzi, and N. Idris, “Simplified VHDL Coding of Modified Non-Restoring Square Root Calculator,” *Int. J. Reconfigurable Embed. Syst.*, vol. 1, no. 1, pp. 37–42, 2012.
- [11] D. Automation, S. Committee, and I. Computer, *IEEE Std 1076-2008 (Revision of IEEE Std 1076-2002) IEEE Standard VHDL Language Reference Manual*, vol. 2008, no. January. 2009.

# **ANÁLISIS TRANSITORIO DE ESFUERZOS PARA UNA BARRA TRANSMISORA DE PMMA EMPLEADA EN UN SISTEMA DE HOPKINSON**

***Ruth Ivonne Escobedo Carranza***

Instituto Tecnológico de Celaya

*ruth\_64911@hotmail.com*

**Luis Alejandro Alcaraz Caracheo**

Instituto Tecnológico de Celaya

*alejandro.alcaraz@itcelaya.edu.mx*

## **Resumen**

El propósito de este trabajo es realizar un análisis transitorio para determinar los esfuerzos en una barra con cambio de sección de polimetilmetacrilato (PMMA) de un sistema de barra de Hopkinson, utilizando un software de elementos finitos comercial. Para ello se modeló la mitad del sistema de la barra, incluyendo el buje, el cual es el responsable de sostener la barra y una tabla que funciona como freno de la misma, para el análisis se simuló el impacto con una presión de 17 psi equivalente a la presión saliente del compresor. Con el fin de conocer si es viable utilizar esta geometría de barra para dicha aplicación.

**Palabra(s) Clave(s):** barra de Hopkinson, impacto, simulación.

## **1. Introducción**

Uno de los sistemas de impacto utilizado para la caracterización de materiales, es el sistema de barras de Hopkinson el cual es un dispositivo capaz de deformar una probeta a una alta velocidad de deformación. Se le conoce como barra de Hopkinson, ya que en este hay un par de barras cilíndricas simétricas que son alineadas y soportadas por elementos de sujeción, estos componentes deben de asegurar la libre traslación de las barras a lo largo de su propio eje. Ambas barras

se instalan con sus caras transversales paralelas una de la otra, dejando un espacio entre cada cara, en el cual se coloca el material que se desea ensayar. Una vez que ambas barras sujetan el material, el disparador, impulsa un proyectil, para producir el impacto deseado. Cuando se realiza un disparo, el proyectil corre a lo largo del cañón, golpeando a la primera barra, denominada barra incidente; al momento del impacto se produce un pulso incidente el cual se divide en una onda que se refleja y regresa por la primera barra, a este pulso se le conoce como onda reflejada, mientras que la otra parte de la onda descompuesta, se transfiere a la segunda barra, a este pulso se le conoce como onda transmitida, la segunda barra se le llama barra transmisora. La figura 1 muestra un esquema general de cómo es que se compone una barra de Hopkinson para ensayos de compresión.

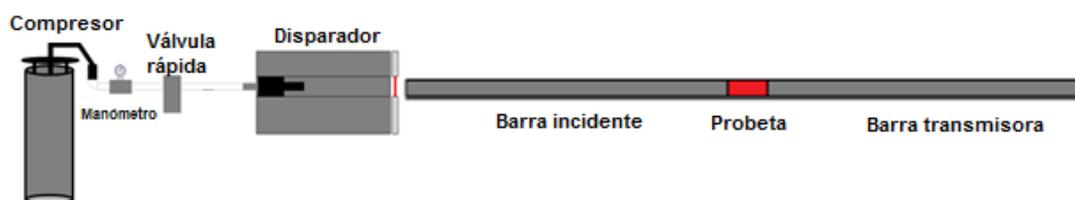


Figura 1 Esquema general de la barra de Hopkinson.

Puesto que las probetas que se ensayarán son de material celular (aluminio plexoplegado), cuentan con una impedancia mecánica muy baja, las barras deberán de tener una impedancia similar al espécimen de prueba. De acuerdo a la teoría es importante considerar el PMMA para la fabricación de las barras a pesar de que cuenta con una desventaja, ya que presentan un comportamiento inelástico, a diferencia de barras de acero o aluminio (barras usadas comúnmente para pruebas en metales) cuyo comportamiento es meramente elástico. Las barras serán alineadas por medio de bujes, por los cuales las barras deberán deslizarse libremente, este acoplamiento se muestra en la figura 2. Estas barras tienen un diámetro comercial mayor a lo necesitado, por lo que se planeó maquinarlas. Debido a los procesos de fabricación, maquinar barras de PMMA es complicado ya que requiere maquinaria especial, por lo que solo se logró maquinar los extremos de cada una de las barras. Esta limitante tuvo como consecuencia que

la barra no maquinada llegara a impactar con los bujes, lo que al parecer provoco la ruptura de la misma, la cual se muestra en la figura 3.

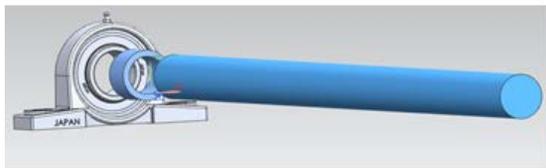


Figura 2 Acoplamiento de barra con buje.



Figura 3 Ruptura en barra transmisora.

Se usará ANSYS© para comprobar que la fractura fue causada por el choque entre la barra y el buje debido al cambio de sección.

## 2. Métodos

Se realizó un modelado en CAD del cual se tomó solo la mitad de la barra transmisora, barra que sufrió la falla o fractura (figura 4).

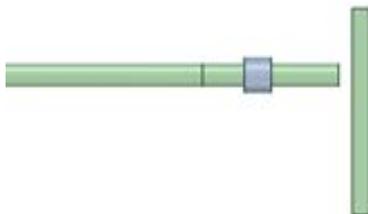


Figura 4 Sistema modelado de la parte a simular.

Se exportó el modelo a ANSYS© para la simulación bajo la carga de impacto. Y se seleccionó el tipo de análisis que se desea realizar en este caso en análisis Transitorio., debido a que es una simulación más simplificada que una dinámica teniendo la ventaja de arrojarnos los resultados que requerimos para comprobar la fractura del componente o barra transmisora.

Se dieron de baja dos materiales a usar, PMMA para la barra (figura 5) y el Nylamid como un segundo material para la tabla y buje (figura 6).

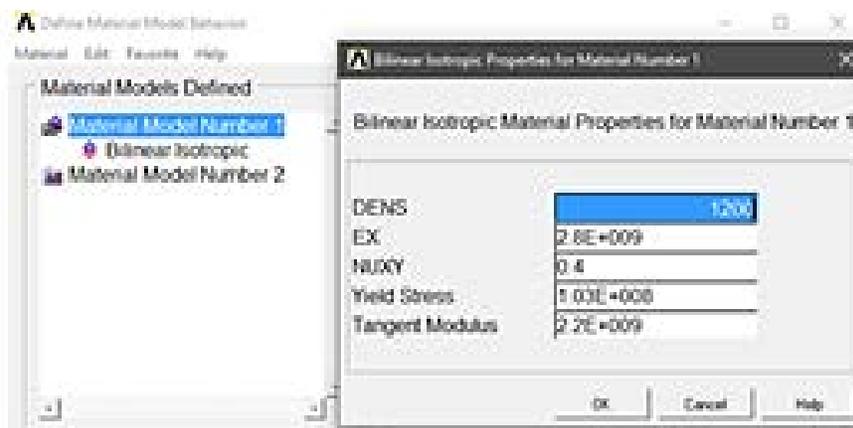


Figura 5 Baja material PMMA.

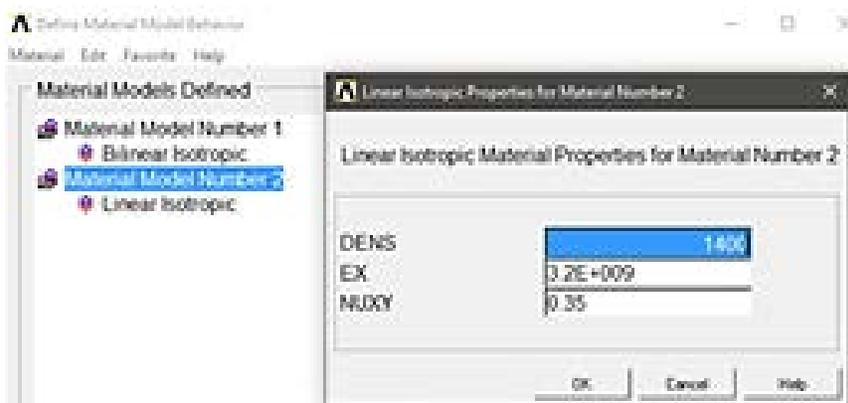


Figura 6 Baja material Nylamid.

Se utilizaron elementos 3D SOLID 184, debido a que es un tipo de elemento que trabaja en 3D con 8 nodos permitiéndonos tener los grados de libertad en desplazamiento, aceleración y rotación en X, Y y Z. Este tipo de elemento solo es usado en análisis dinámicos. Se cargó un segundo elemento el MESH 200 el que se le dio el atributo de ser usado como elemento cuadrilátero de 8 nodos, el cual nos ayudará mallar el volumen de la barra por medio de áreas.

Se mallaron los dos volúmenes superiores de la barra con elementos cuadriláteros, la parte superior de la barra se malló usando el MESH 200 para las áreas y después se usó el mallado en el volumen, usando esto como guía para la malla interna. La parte inferior se pudo mallar con facilidad siguiendo el comportamiento de los elementos del área de la base que comparte con los volúmenes inferiores, por lo que solo se malló como volumen. Los volúmenes restantes, buje y tabla, se

mallaron de igual manera solo por volumen con elementos cuadriláteros (figura 7). La malla final tiene elementos tipo tetraédricos, con una medida por elementos de 0.005 mm, figura 8.

Con respecto a las condiciones de frontera, se aplicaron restricciones en el área de la tabla de la cual está sujeta, de igual manera se restringió todo movimiento del buje para simular su total empotramiento lo que no permite movimiento alguno, y finalmente se restringió la barra en x y z para simular la simetría (figura 9a). Por último, se aplicó una presión de 17 psi para simular el impacto del componente incidente con el transmisor, la cual se muestra como dos flechas rojas en el área superior de la barra, figura 9b.

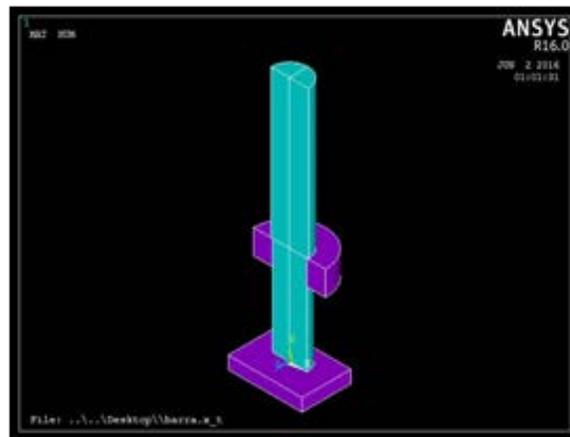


Figura 7 Modelo de los diferentes materiales: Azul PMMA y el morado Nylamid.

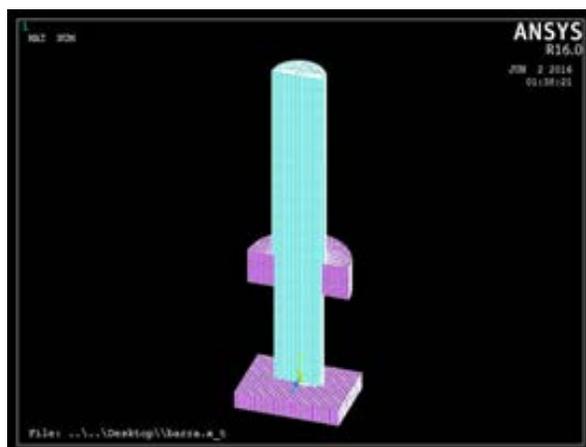


Figura 8 Malla de modelo completo.

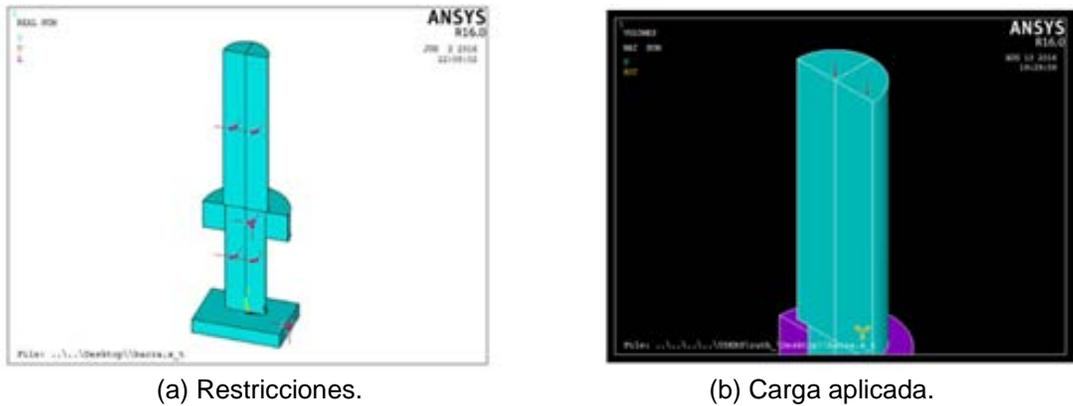


Figura 9 Condiciones de frontera.

Para simular los contactos que se tienen en la parte a analizar, se colocaron tres contactos (figura 10) del tipo surface to surface con un comportamiento standar, los cuales fueron colocados:

1. Área del cable de sección de la barra–cara superior del buje.
2. Cuerpo de la barra–cuerpo del buje.
3. Cara inferior de la barra–tabla.

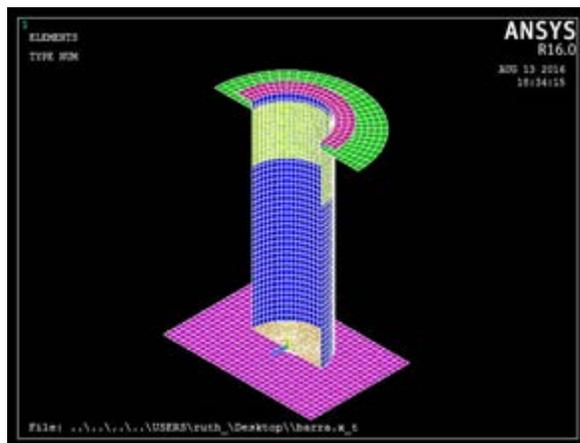
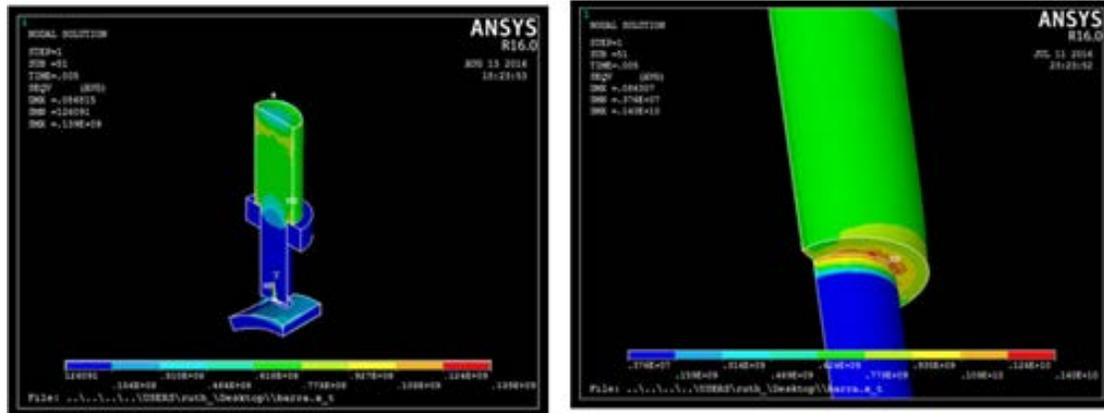


Figura 10 Contactos.

### 3. Resultados

Tomando en cuenta que el esfuerzo máximo del PMM es de 75 MPa, se realizaron las simulaciones en los cuales los resultados en Ansys© se puede observar que la barra al ser impactada en el buje provoca un esfuerzo de 140 MPa

(figura 11), aunque la zona donde se genera este esfuerzo es muy pequeña se puede decir que a los primeros golpes lo único que ocasiona es que el material se debilite y haga pequeñas fisuras, lo que posteriormente provoco la ruptura al ser impactada varias veces.



a) Todo el cuerpo análisis.

b) Acercamiento de la zona con el mayor esfuerzo.

Figura 11 Resultados de análisis en Ansys©.

#### 4. Discusión

Como se observó en el análisis, el constante choque de la barra con el buje provoco a la larga su ruptura, ya que el esfuerzo generado es el mayor al del material, comprobando así que el cambio de sección afecta de manera considerable al sistema de barras de Hopkinson.

Por lo que se buscara nuevas alternativas para la sujeción y alineación de estas barras, debido que cambiar el material de estas no está a consideración debido a que la impedancia de estas es la más acercada al material a ensayar, punto importante en los ensayos donde se usan barras de Hopkinson.

#### 5. Bibliografía y Referencias

- [1] J. Van Der Geer, J. A. J. Hanraads, R. A. Lupton, Journal of Science Communication, No. 163, 2000.
- [2] C. Weinong, Split Hopkinson (Kolsky) bar design, testing and applications, Springer, Estados Unidos, 2011.

- [3] Castro I., Alejandro I., Caracterización mecánica de espumas metálicas y su aplicación en sistemas de absorción de energía, 2012
- [4] ASM Mechanical Testing and Evaluation, pág. 939-1096.
- [5] Jesús Rodríguez Pérez, Análisis y desarrollo de metodologías para la obtención de propiedades mecánicas de materiales a altas velocidades de deformación a alta temperatura, Madrid, 2002.
- [6] Zhao H., Gary G., Klepaczko J. R., On the use of a viscoelastic split Hopkinson pressure bar. *International Journal of Impact Engineering*, pág 319-330, 1997.
- [7] ANSYS MAPDL manual 15.0.

# **EMULADOR DE SEÑALES PARA PRUEBAS EN CONTROLADORES DE SISTEMAS TRIFÁSICOS**

***Leonel Estrada Rojo***

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato

*l.estrada@itsur.edu.mx*

***Julio Ortega Alejos***

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato

*j.ortega@itsur.edu.mx*

***Carlos Alberto Fuentes Hernández***

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato

*ca.fuentes@itsur.edu.mx*

## **Resumen**

En el presente artículo se muestra el desarrollo de un emulador de señales trifásicas, la finalidad de este equipo es el de poder analizar de manera controlada y sin peligro, controladores de sistemas trifásicos y de esta manera conocer la respuesta de los sistemas de control ante las diversas variaciones que se pueden presentar en la línea de alimentación trifásica como pueden ser sag, swells o armónicos. Para realizar la implementación del emulador se recurrió a LabVIEW como lenguaje de programación debido a la facilidad de uso y como hardware a una tarjeta MyRIO de la misma compañía. En la interfaz de usuario del emulador se pueden configurar parámetros como: inyección de armónicos, desfaseamiento y cambio en las amplitudes en cada fase de la señal trifásica.

**Palabra(s) Clave(s):** armónicos, emulador, pruebas en controladores, señal trifásica.

## **1. Introducción**

En el desarrollo de nuevos productos es de vital importancia verificar el funcionamiento ante diversos fenómenos que puedan alterar el comportamiento o incluso causar la destrucción del producto. Esto no es ajeno al diseño de sistemas electrónicos, una de las metodologías de diseño que se sigue comúnmente es: generar las especificaciones de diseño, dimensionar los componentes, simular el sistema en lazo abierto, proponer un controlador y llevar a cabo una simulación en lazo cerrado, armar un prototipo, implementar el controlador y por último sintonizar el controlador [1], es a partir de la etapa de simulación donde se pueden presentar problemas ya que rara vez los resultados obtenidos en simulación funcionan de la misma manera en el sistema real. Fallas en el controlador pueden ocasionar fallas en el sistema, estos problemas pueden generar pérdida de tiempo, ya que solo se tendrá que regresar a un punto de la metodología de diseño, pero en algunos otros casos se puede presentar el daño de componentes o incluso todo el prototipo de forma irreversible e inclusive lesiones en los seres humanos.

### **Problemas en las redes de alimentación trifásicas**

Los principales fenómenos que ocurren en las fuentes de alimentación trifásicas se enlistan a continuación: desviación de frecuencia, amplitud de la tensión, variaciones de la tensión, variaciones rápidas de la tensión, sag, dips, huecos de tensión, Interrupciones breves de la tensión, interrupciones largas de la tensión, sobretensiones temporales, sobretensiones transitorias, desequilibrio de la tensión, tensiones y corrientes armónicas [2]. Estos fenómenos son complicados de replicar en los laboratorios, ya que se requiere de equipo especializado para generarlos y así poder validar el funcionamiento de los sistemas de control.

#### **Generadores de señales trifásicas**

En el mercado ya existen algunos equipos que pueden generar señales y funciones arbitrarias, en su mayoría son de un solo canal, pero también los hay de tres o cuatro canales [3]. Es con estos dispositivos que las personas pueden probar los controladores desarrollados y verificar el funcionamiento de su sistema ante posibles problemas que pueden llegar a presentarse en las redes de alimentación

trifásicos. El principal problema de estos equipos es su costo el cual oscila entre los \$8,000 USD hasta los \$64,000 USD los cual los hace inalcanzables para algunas organizaciones.

### **Fuentes de alimentación trifásicas**

Otra posible solución son las fuentes de alimentación trifásicas. Estas son equipos que permiten replicar de forma controlada a la red de alimentación eléctrica, el problema con estos equipos es que son de alta potencia y voltaje, y aun y cuando ofrecen protección a los sistemas que están siendo probados, como puede ser la limitación de corriente en su salida, no son prácticas para probar el circuito controlador ya que es necesario realizar toda una instrumentación para acondicionar los niveles de voltaje a los adecuados para el controlador. Además tienen un costo que oscila entre los \$5,500 USD a los \$25,000 USD dependiendo de la potencia que pueden entregar [4].

Debido a estas razones en el presente artículo se muestra el desarrollo de un instrumento virtual capaz de generar señales trifásicas y emular algunos de los problemas que se presentan de forma más recurrente dentro de los sistemas de alimentación.

## **2. Métodos**

El sistema está basado en la tarjeta de desarrollo de bajo costo MyRIO de la compañía National Instruments. La arquitectura de esta tarjeta se muestra en la figura 1, esta tiene un procesador y un FPGA, en el procesador se pueden realizar cálculos con números en formato flotante lo cual es de mucha ayuda para agilizar tiempos de diseño y cálculos complejos, en el FPGA se realiza toda la comunicación con las salidas o entradas que tiene la tarjeta, esta es una ventaja muy importante ya que se pueden hacer adquisiciones o generación de señales en paralelo [5]. Otra de las características por la que se escogió esta plataforma es porque puede programarse con el lenguaje LabVIEW el cual es gráfico, lo que facilita la programación y generación de código.

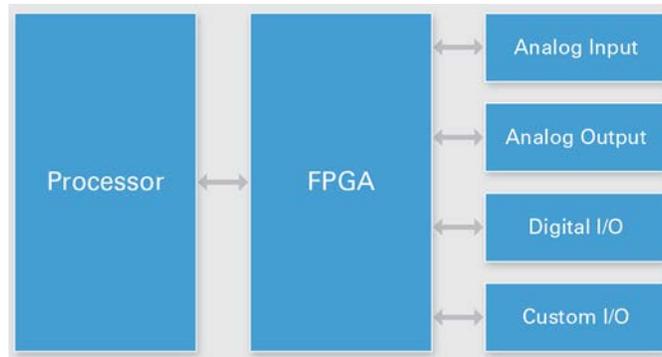


Figura 1 Estructura de NI myRIO.

### Creación del instrumento virtual

El proyecto realizado consta de dos archivos de LabVIEW uno sobre el FPGA y otro sobre el procesador. En el archivo del procesador esta la interfaz gráfica de usuario del equipo desarrollado, también se realiza el acondicionamiento de señales que se enviarán al FPGA y la comunicación entre ellos. En la figura 2 se muestra la interfaz gráfica de usuario del sistema, consta de varios controles que sirven para modificar los parámetros de las señales.

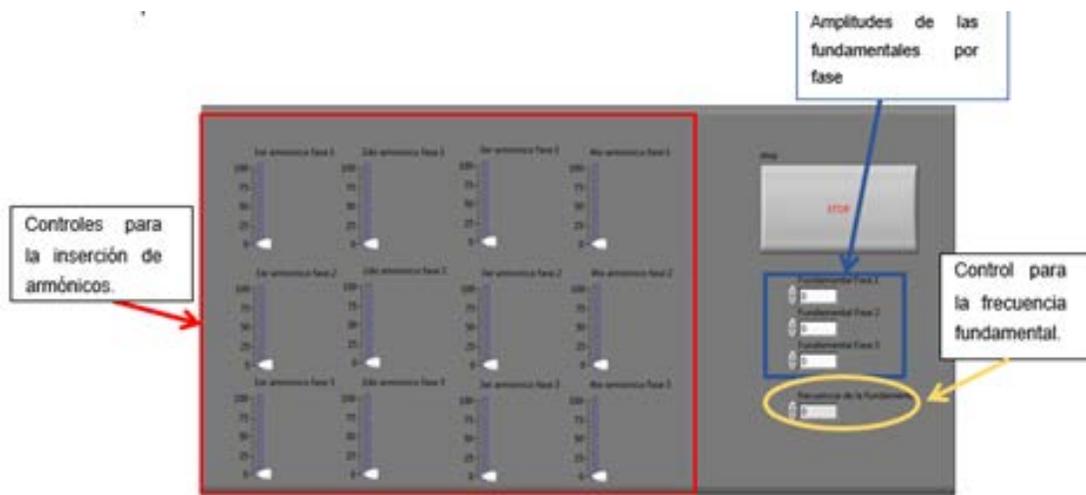


Figura 2 Interfaz gráfica de usuario del generador de señales trifásicas.

En la figura 3 se muestra una parte del código desarrollado para el acondicionamiento de la interfaz gráfica de usuario y de la comunicación con el FPGA.

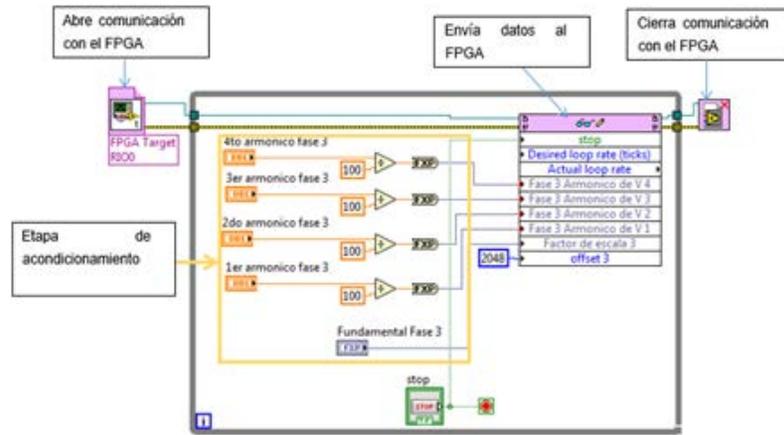


Figura 3 Parte código del procesador, acondicionamiento y comunicación con el FPGA.

En la parte del FPGA del instrumento se lleva a cabo la generación de las señales en base a los parámetros ingresados en la interfaz gráfica de usuario. Esta etapa está basada en el uso del bloque mostrado en la figura 4 el cual produce una señal senoidal punto a punto, los parámetros de entrada a la función son la frecuencia y la fase.

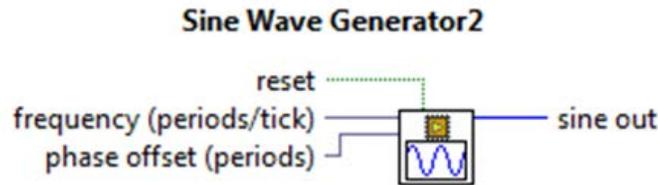


Figura 4 Función generador de forma de onda senoidal.

Para lograr la frecuencia deseada de la señal senoidal solo se tiene que cambiar el valor en su entrada usando ecuación 1.

$$F = \frac{f_D}{f_{FPGA}} \quad (1)$$

Donde:

$F$  : Valor entrada frequency de la función generador de onda senoidal (Hz).

$f_D$  : Frecuencia deseada (Hz).

$f_{FPGA}$  : Frecuencia de reloj de la FPGA (40MHz).

Para hacer que la fase cambie a la que se quiere se debe de utilizar ecuación 2.

$$\theta = \frac{\phi_D}{2\pi} \quad (2)$$

Donde:

$\theta$  : Valor entrada de la fase a la función generador de onda senoidal (rad).

$\phi_D$  : Ángulo de fase deseado (rad).

La señal senoidal generada es de 212 bits es decir tiene 4096 valores, los convertidores digital a analógico de la tarjeta MyRIO también son de 212 bits y un voltaje a escala completa de 5V, es decir que si se genera una onda y se saca por una salida analógica de la MyRIO se obtiene una señal de 0 a 5 V lo cual sería la amplitud máxima de la señal, para cambiar la amplitud de la señal, a la salida de la función, se debe multiplicar por una constante que esté en el rango de 0 a 1 esto con el fin de no saturar al convertidor analógico a digital (DAC por sus siglas en inglés). Es labor de la persona que use el equipo dar un significado en cuanto a amplitud representada por la señal senoidal generada, por ejemplo una salida de 1.25 Vp puede representar una señal de 180 Vp.

Para agregar contenido armónico a las señales fundamentales, se utilizaron más bloques de funciones sinusoidales, pero la frecuencia es multiplicada por múltiplos impares a la fundamental (armónico 3, 5, 7 y 9) y sumados a la señal fundamental. De manera que en la interfaz de usuario se puede agregar un armónico específico a cada fase con su respectiva amplitud.

### 3. Resultados

La primera prueba que se realizó al instrumento virtual fue el cambio de amplitud. En la figura 5 se muestra el resultado obtenido, la fase 1 se muestra en un color negro y tiene una amplitud de 0.75 Vp, la fase 2 se muestra en color rojo con una amplitud de 1.3 Vp y por último la fase 3 en color verde muestra una amplitud de 0.2 Vp, también se puede notar el desfase conseguido en cada fase el cual es de 120°.

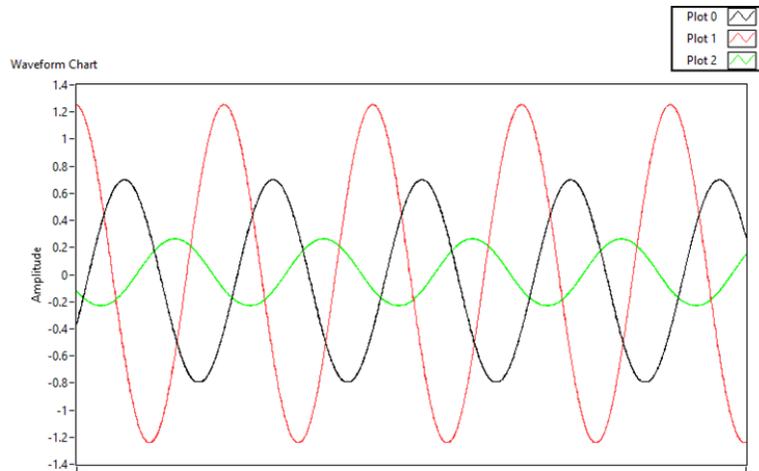


Figura 5 Señales generadas a diferentes amplitudes y desfase de 120° entre ellas.

Algunos otros resultados obtenidos son la generación de armónicos a la señal trifásica generada. En la figura 6 se muestra la interfaz gráfica de usuario configurada para que en la fase 1 no tenga armónicos, la fase 2 presente el tercer y quinto armónico y la fase 3 presente del tercer al noveno armónico.

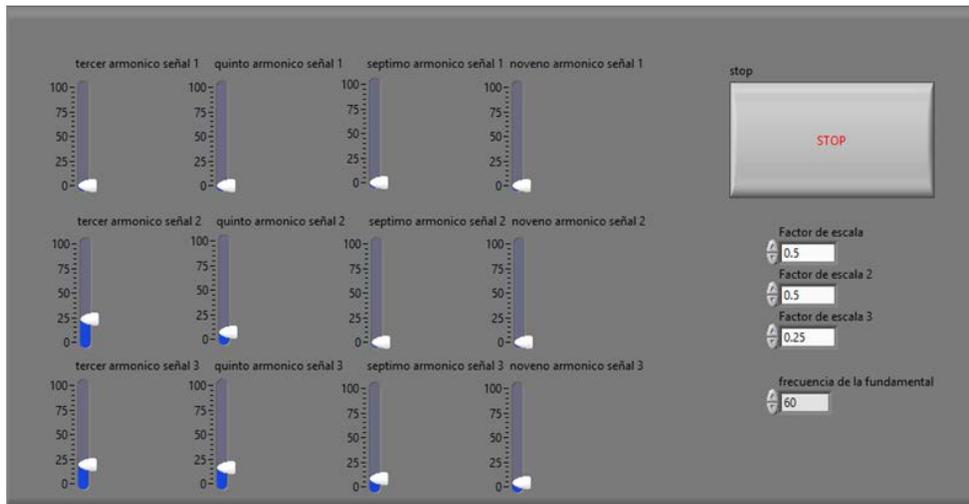


Figura 6 Interfaz gráfica de usuario con generación de armónicos.

En la figura 7 se muestran las señales generadas en el tiempo. Se observa como la fase 1 no presenta contenido armónico y las otras dos fases si lo tienen.

En la figura 8 se observa el espectro de las señales por fase, se observa como la fase 1 no contiene armónicos, la fase 2 contiene armónicos a la frecuencia de 180

Hz y 300 Hz y la fase 3 contiene armónicos a las frecuencias de 180, 300, 420, 540 Hz.

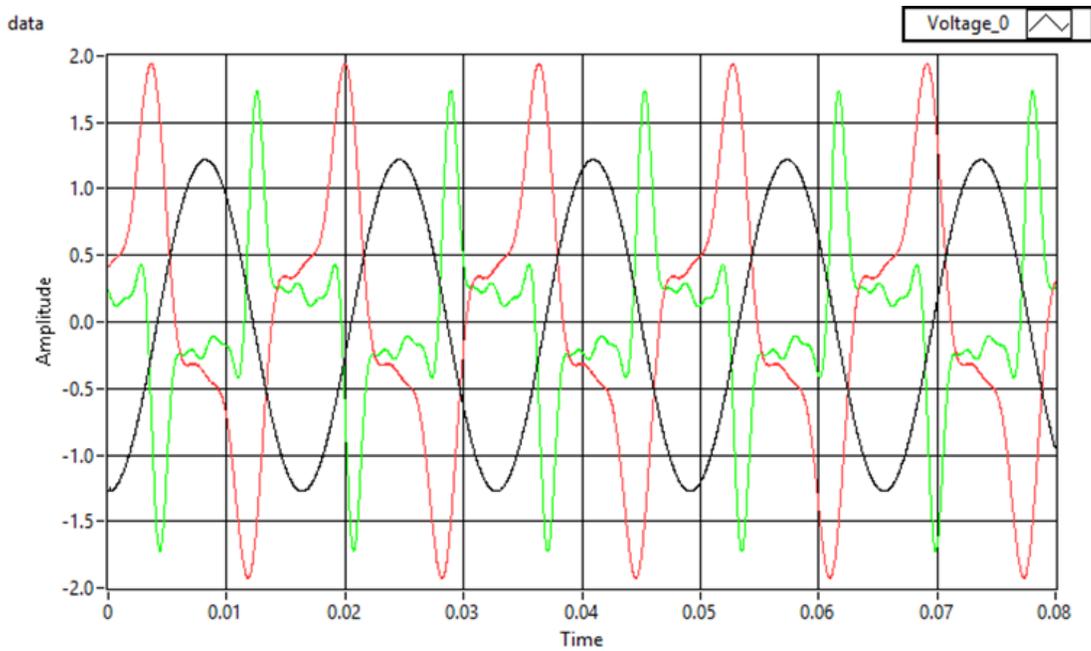


Figura 7 Señales generadas con contenido armónico.

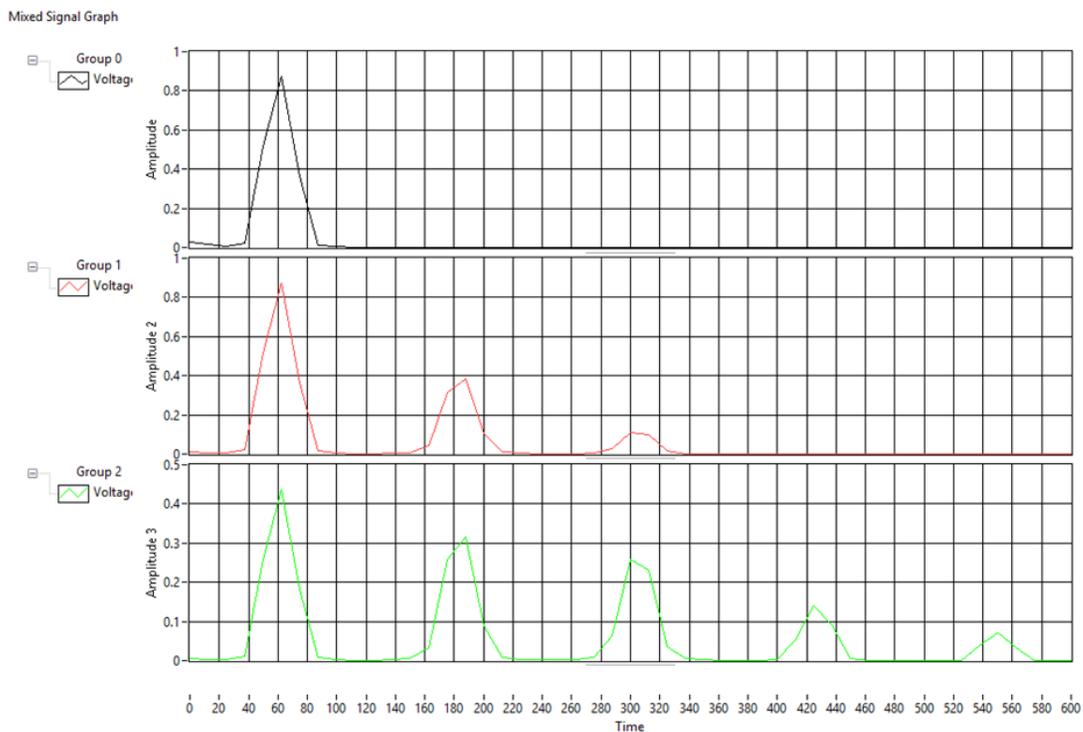


Figura 8 Espectro de las señales generadas con contenido armónico.

## 4. Conclusiones

En este artículo se presenta el desarrollo de un instrumento virtual que es capaz de generar señales trifásicas con perturbaciones. El sistema utiliza una tarjeta MyRIO de bajo costo de la compañía National Instruments. Se programó tanto el FPGA como el procesador que contiene utilizando el software LabVIEW de la misma compañía.

El desarrollo del emulador es sencillo y se obtuvieron resultados satisfactorios al generar la señal trifásica con presencia de armónicas y cambios en los parámetros fundamentales de las señales.

Esta herramienta puede llegar a ayudar a las personas a probar sistemas de control para equipo trifásico de una forma sencilla, barata y sin riesgos.

## 5. Bibliografía y Referencias

- [1] P. P. a. S. S. Shahram Karimi, «An HIL-Based Reconfigurable Platform for Design, Implementation, and Verification of Electrical, System Digital Controllers,» *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, vol. 57, n° 4, pp. 1226-1236, 2010.
- [2] G. M. R. Leal, «Calidad de la energía eléctrica: camino a la normalización,» de Simposio de Metrología, Santiago de Queretaro, México, 2008.
- [3] F. T. S. d. C.V., «Final Test,» 01 01 2016. [En línea]. Available: <http://www.finaltest.com.mx/category-s/127.htm>. [Último acceso: 07 07 2016].
- [4] F. T. S. d. C.V., «Final Test,» Final Test, 01 01 2016. [En línea]. Available: <http://www.finaltest.com.mx/AC-power-supplies-s/33.htm>. [Último acceso: 07 07 2016].
- [5] National Instruments, NI MyRIO-1900 User guide and Specifications, Austin, Texas, USA: National Instruments, 2016.

# CONTROL DE PÉNDULO INVERTIDO UTILIZANDO TEORÍAS DE CONTROL CLÁSICO Y TÉCNICAS DE VISIÓN

***Bruno González Sánchez***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*12030373@itcelaya.edu.mx*

***Martín Laguna Estrada***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*Martin.laguna@itcelaya.edu.mx*

## **Resumen**

Actualmente bastantes de los mecanismos industriales se operan de manera manual o se pueden programar para que realicen tareas repetitivas o siempre realicen una misma función, muchos de ellos no se adaptan a ciertos cambios como el ser detectados a través de captura de imágenes y en base a esta captura, mandar señales que manipulen el mecanismo. Al utilizar medios visuales de monitoreo, se puede expandir su uso a aumentar la velocidad de producción en las líneas de ensamble y selección, todo esto solo con la captura de imágenes. Aunado a las teorías de control clásico aplicadas para controlar el movimiento de un péndulo invertido, se presenta adicionalmente el diseño y desarrollo de un prototipo de esta naturaleza. Para el logro de tal fin, se utilizó el software LabVIEW y una placa de adquisición y escritura de datos para el control de dicho péndulo, así como módulos de visión para estabilizar su movimiento.

**Palabra(s) Clave(s):** control, escritura de datos, LabVIEW, módulos de visión, péndulo invertido, placa de adquisición.

## **1. Introducción**

Ciertos procesos industriales requieren de un monitoreo no invasivo, el monitoreo por visión es una alternativa que ofrece cero contacto, a diferencia de

otros sensores que tienen que hacerlo directamente con la materia dentro del proceso, lo que puede ocasionalmente contaminar el producto. Con lo anteriormente mencionado, se pretende realizar un prototipo de péndulo invertido del que no estén sujetos sensores invasivos como puede ser el monitoreo con una cámara de video. Un péndulo invertido es un sistema que puede desestabilizarse de manera muy brusca al ser perturbado externamente. Para poder controlar esta perturbación, se debe generar un control que permita mandar señales lo más rápido posible.

El procesamiento de imágenes es más tardado que el procesamiento de una señal analógica de voltaje por ejemplo, aun así al analizar una imagen podemos monitorear más variables como distancias colores, luz, posición y formas. Este retraso en el procesamiento de la información representa un verdadero reto ya que el sistema debe responder rápidamente para lograr mantener el péndulo siempre en posición vertical.

## **2. Justificación**

Actualmente ya existen cámaras capaces de monitorear temperatura y colores que están fuera del espectro de frecuencia del ojo humano, lo que amplía exponencialmente las aplicaciones de técnicas de visión. Mediante este proyecto se pretende manipular la posición un sistema por medios visuales y monitorear otras características del mismo a largo plazo, como posiciones variables e incluso toma de decisiones propias, por lo que resulta un buen experimento dentro del campo de la visión artificial.

Los sistemas de visión artificial comprenden una tecnología cuyo desarrollo ha crecido significativamente en los últimos años, fomentando el reemplazo de múltiples sensores hacia la adquisición de información a través del procesamiento online de imágenes. El creciente interés en esta tecnología reside en la elección y determinación de la misma como un recurso estratégico para desarrollos asociados al control y monitoreo de dispositivos mecánicos sub-actuados y robóticos. Con el objetivo de analizar la posibilidad de reemplazar sensores tradicionales por técnicas de procesamientos de imágenes en sistemas que

requieran la aplicación de control de manera continua, precisa y veloz, se propone un sistema de medición basado en visión artificial para el monitoreo dinámico de un péndulo invertido. Debido a sus no linealidades, su inestabilidad intrínseca y su modelo sencillo, el péndulo invertido suele ser utilizado como modelo de referencia para analizar el desempeño de los sistemas de control.

### **3. Objetivos**

El objetivo principal de este proyecto es realizar el control de un péndulo invertido utilizando como sensor de retroalimentación una cámara para adquirir imágenes y procesarlas en un software. Mediante técnicas de instrumentación manipular la información obtenida de cada imagen y procesarla para mandar señales que controlen la posición del péndulo. El propósito es que el péndulo sea capaz de mantenerse vertical en todo momento y responder de manera rápida ante las perturbaciones externas. Se pretende de igual manera, Implementar y diseñar un control (PI, PD, PID) que permita que el sistema sea rápido y estable.

### **4. Desarrollo**

Los elementos de un péndulo invertido lo constituyen un elemento móvil en la base y una varilla sujeta al elemento móvil como ya se ha mencionado anteriormente. Se ha optado por un diseño que se adapte al mecanismo de cremallera de una impresora. En la figura 1 se observa la estructura que contiene la cremallera y un motor a pasos el cual originalmente ocasionaba el movimiento del cartucho de tinta. Se puede observar que el mecanismo se ha sujetado a una base rectangular de madera para evitar que los movimientos bruscos del motor se presenten en la estructura.

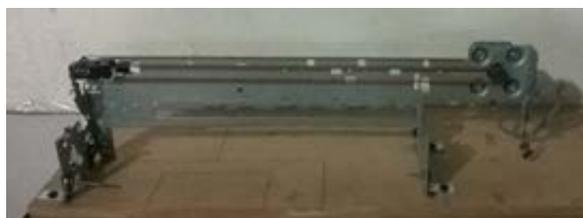


Figura 1 Mecanismo de cremallera.

La cremallera que se encontraba fija en el cartucho de tinta se ha modificado con ayuda de un mototool para que a éste se pueda sujetar una varilla de madera que gira libremente. En la figura 2 se puede observar el resultado de la modificación del cartucho.



Figura 2 Cartucho modificado.

Al colocar la base junto con la cremallera se observó que por el peso de algunos elementos no se sostenía de manera recta, para compensar esta situación, se le agregaron unas pequeñas guías en la parte trasera para que la base se pueda sujetar de la propia estructura y de esta manera la estructura no presente perturbaciones que pudieran impedir el movimiento de la base. En la figura 3 se observa la base desde la parte de atrás para poder apreciar las guías que se han colocado. En la figura 4 se muestra la base colocada en la cremallera.



Figura 3 Base con perspectiva.

El elemento de visión es quizá el más importante en el proyecto, debido a que será el elemento de retroalimentación, fundamental para un buen control, LabVIEW

será el software utilizado para la adquisición y el procesamiento de la imagen con ayuda del módulo de visión.



Figura 4 Base en cremallera-visión.

El primer paso es obtener la señal visual a través de una webcam para posteriormente procesarla. En esta etapa del proceso hay que considerar no solo la resolución sino también las características propias del equipo de cómputo, debido a que si se adquiere una webcam con una resolución muy alta y el equipo con él se cuenta tiene características de desempeño bajas entonces al utilizar la webcam en la computadora observaremos lentitud al momento de capturar el video. Debido a los altos tiempos de procesamiento que necesita el equipo para mostrar la imagen de video, una cámara de mediana resolución fue la elegida para este fin. Una vez adquirida la imagen es necesario instalar previamente los controladores del dispositivo. Finalizado este proceso, se puede trabajar con la cámara web sin mayor problema dado que se tiene control sobre las acciones que se realizan hasta este punto.

El objetivo principal del elemento de visión es transformar los datos de visión en datos numéricos y obtener una medición o una posición que se traduzca en alguna característica del sistema monitoreado, de esta manera dicho dato numérico se puede utilizar posteriormente como un dato para programación.

La cámara se posicionó a una distancia adecuada de la estructura del péndulo tratando de ubicar la webcam lo más centrada posible. En la figura 5 se observa el posicionamiento de la cámara frente al péndulo.



Figura 5 Posicionamiento de la cámara.

### **Configuración del asistente de adquisición de imagen**

Mediante el uso del software LabVIEW y con la cámara conectada a uno de los puertos USB de la computadora, se colocó el bloque “vision acquisition”, que es el asistente para inicializar una cámara disponible en nuestro equipo (figura 6).



Figura 6 Vision acquisition.

Instantáneamente después de colocar el bloque, nos aparece una ventana donde se muestran los dispositivos de video disponibles y se elige el dispositivo correcto. En la figura 7 se observa lo anteriormente mencionado. Continuando con la configuración, se selecciona el tipo de adquisición continua, el cual permite que el proceso programado trabaje en un ciclo que se repite indeterminadamente. Aunado a esto, cada vez que el ciclo se repita, se adquiere una nueva imagen del dispositivo de video. En la figura 8 se observa la selección de este tipo de adquisición. Al seleccionarlo se continúa con el asistente de adquisición de imagen.

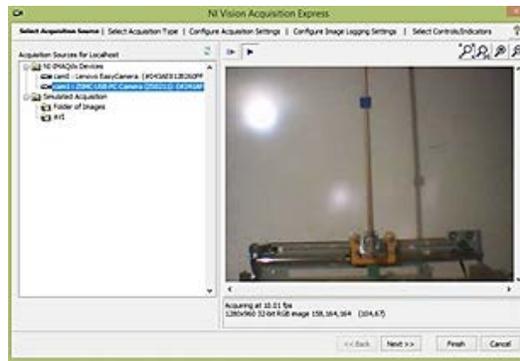


Figura 7 Selección de dispositivo de video.

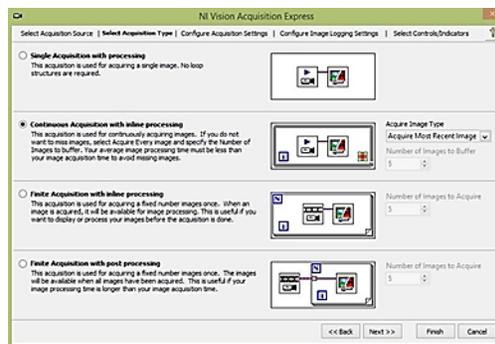


Figura 8 Tipo de adquisición.

En el siguiente paso se selecciona la resolución de video en la ventana de configuración de adquisición de imagen, los fps (por sus siglas en ingles frames per second), son una medida de velocidad para la captura de fotogramas de video. Se ha seleccionado una resolución de 800x600 a 30 fps, se prueba la adquisición de la imagen y se finaliza el asistente. En la figura 9 se observa la ventana de configuración de adquisición de imagen.

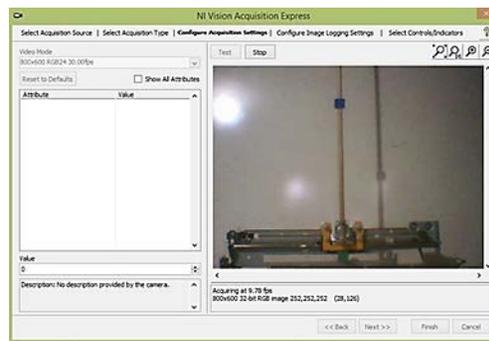


Figura 9 Ventana de configuración de adquisición de imagen.

Al finalizar el asistente, automáticamente se genera un Instrumento virtual en el diagrama de bloques, el cual ya está configurado con las opciones seleccionadas anteriormente y en el panel de control se observa una ventana con la imagen que se captura a través de la cámara. En la figura 10 se observa el VI (Virtual Instrument) generado y en la figura 11 se observa el panel de control.

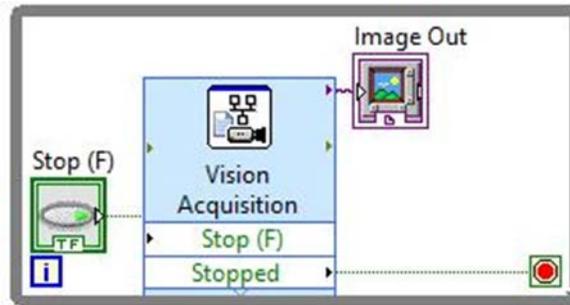


Figura 10 VI generado.

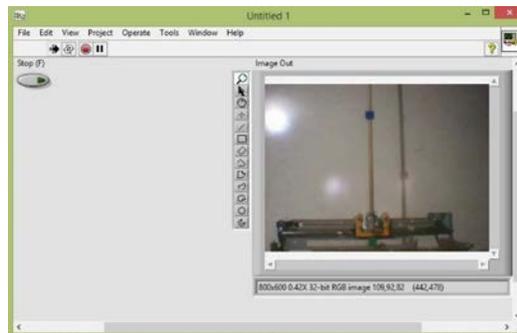


Figura 11 Panel de control.

### Método de identificación de color

Si se observa la figura 5, notaremos la presencia de dos pequeños elementos (referencias), uno de color azul, colocado en la varilla y otro color verde ubicado en la base, el elemento verde únicamente se mueve de forma horizontal siguiendo una trayectoria recta, mientras que el elemento azul girará con respecto a la base pudiendo ésta colocarse en puntos diferentes.

Este método consiste principalmente en ubicar colores en el plano de la imagen. El bloque "Vision Assistant" permite manipular la imagen para obtener información que después puede ser utilizada con otros fines. Este bloque requiere un dato de

entrada, el cual se trata de una imagen, cuando se coloca el bloque en el diagrama de bloques, automáticamente se abre el asistente de visión, en la figura 12 se muestra el bloque del asistente de visión mientras que en la figura 13 se aprecia la ventana que se abre al colocar el asistente de visión.

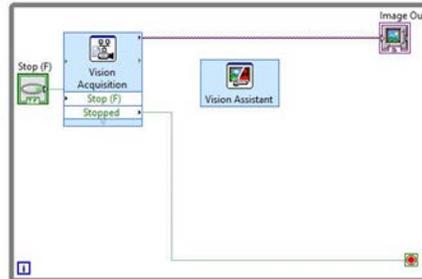


Figura 12 Bloque Vision Assitant.

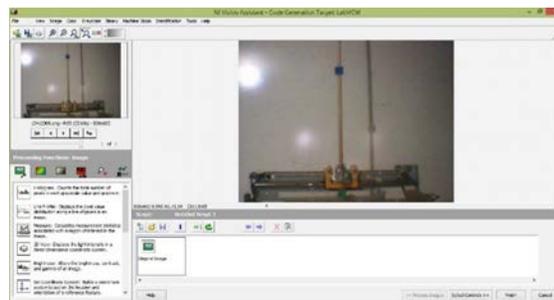


Figura 13 Asistente de visión.

Dentro de las funciones de procesamiento se busca aquella dedicada al color, que se puede identificar igualmente por titularse "Color". En la figura 14 se observan las herramientas de color. En la figura 15 se observa la herramienta a utilizar titulada "Color Pattern Matching" y de acuerdo a la descripción de la herramienta, ésta realiza un chequeo para buscar un modelo o muestra de un color en una imagen completa o una región de ella. Una de las ventajas es que se puede elegir la muestra de color directamente de la imagen de video, por lo que no es necesario introducir el color en un código RGB o CMYK. Esta herramienta seleccionada permite crear una nueva muestra de color y como se ha mencionado anteriormente, se ubicaron dos referencias de color, una azul en la parte alta de la

varilla y otra verde ubicada en la base. De estas dos referencias se crean muestras de color con la idea de que se puedan ubicar los colores en la imagen de video.

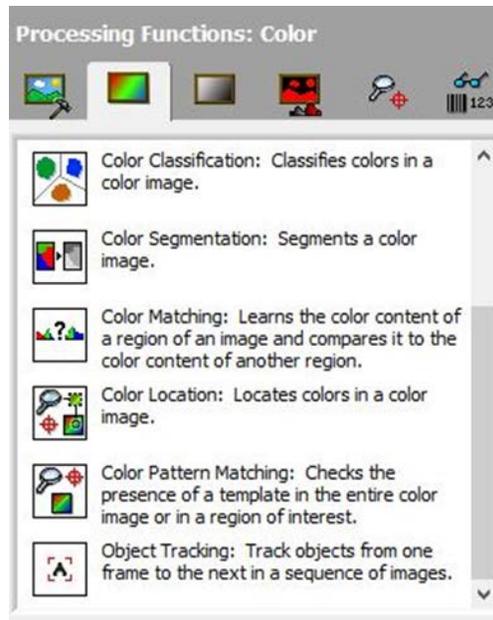


Figura 14 Funciones de procesamiento de color.

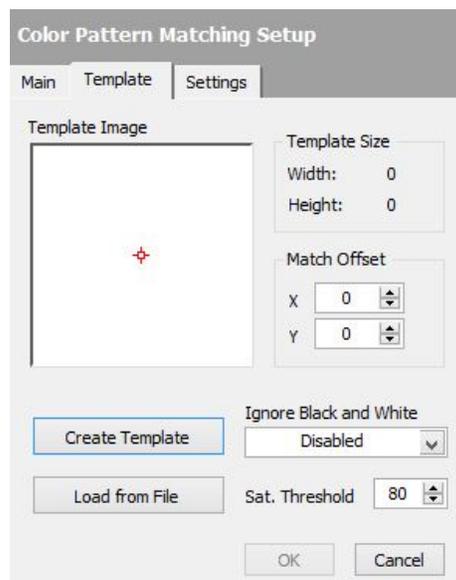


Figura 15 Configuraciones de Color Pattern Matching.

Para crear una muestra, basta con hacer clic en el botón "Create Template", después en la imagen seleccionamos la muestra de color encerrándolo en un

rectángulo de color rojo, al mismo tiempo se muestra un rectángulo verde, la región dentro de este rectángulo es en donde se realiza la búsqueda y ubicación de la muestra. Se pueden modificar las dimensiones de este rectángulo aumentando o disminuyendo la región predeterminada. En la figura 16 se observa la selección de la muestra de color y la región de búsqueda de la muestra. Al generar la muestra se observan también una ampliación de la misma y la ubicación del centro de ésta (figura 17).

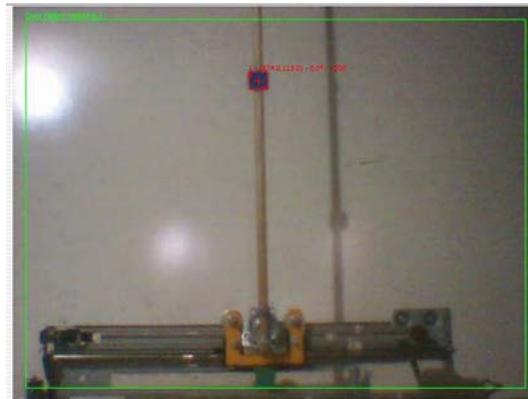


Figura 16 Creando muestra de color.

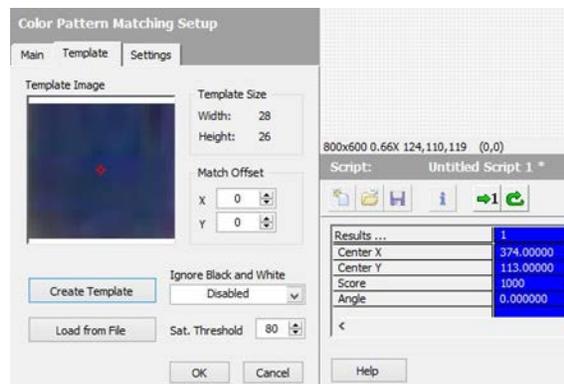


Figura 17 Datos de la muestra generada.

Ahora se selecciona dentro del grupo de funciones de procesamiento de imagen aquella que se identifica por el título "Imagen" (figura 18). La función que se utiliza lleva por título "Set Coordinate System", la cual de acuerdo a la descripción dada, se trata de una herramienta que permite establecer un origen de un sistema de

coordenadas basado en la localización y orientación de alguna referencia, al seleccionar la herramienta, se puede establecer un nombre al sistema de coordenadas y también nos permite seleccionar diferentes modos de movimiento que se pueden monitorear. El objetivo principal es establecer un origen de coordenadas, para que en base a este origen se realice el monitoreo de la muestra que se ha generado anteriormente. En la figura 19 se observa que se ha establecido el origen de coordenadas justo en la parte donde se encuentra la referencia azul.

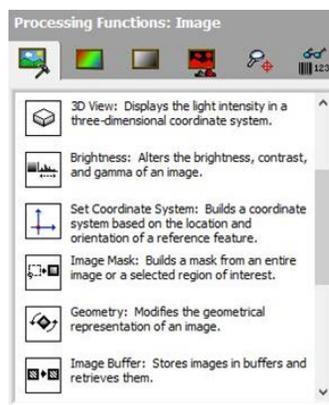


Figura 18 Funciones de procesamiento de imagen.

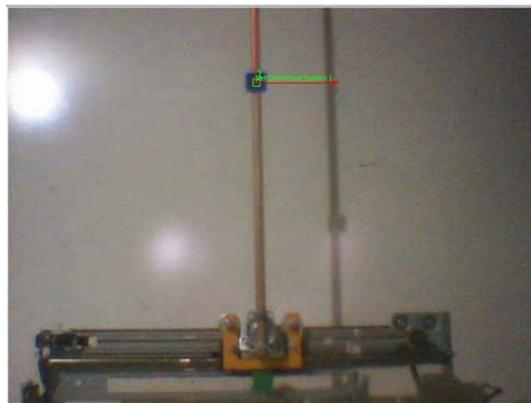


Figura 19 Origen de sistema de coordenadas.

Ahora se realiza el mismo método para la referencia verde ubicada en la base del péndulo, después se podrá visualizar una cadena (figura 20), en la cual se observan las configuraciones que se han realizado. Es importante mencionar que

las muestras de color no serán siempre las mismas a pesar de que físicamente no se hayan cambiado las referencias, se trata más que nada de la iluminación del ambiente que ocasiona que el color sea más brillante o más opaco. Esto no resulta un problema tan grave, ya que se puede modificar la muestra de color en cualquier momento así como cualquier otro atributo que hasta ahora se ha configurado, para ello solo basta hacer doble clic en alguno de los iconos encadenados, para poder modificar los atributos del mismo.

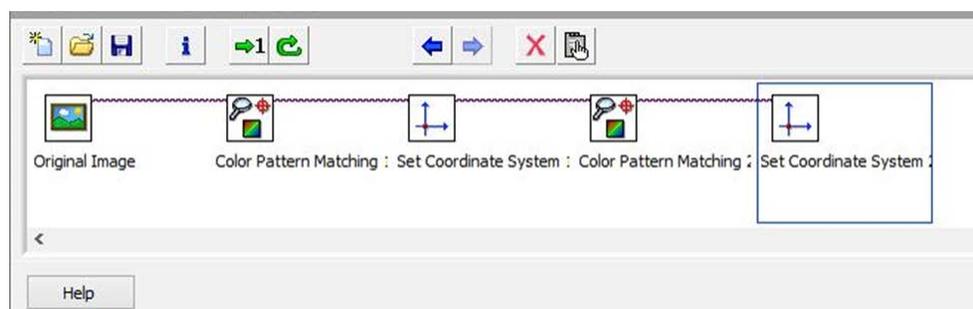


Figura 20 Procesos.

### Método de identificación de bordes

Este método consiste en identificar los bordes de una figura y en base a ellos realizar mediciones. Esto se puede realizar dentro del asistente de visión. Antes de comenzar se prepara un ambiente necesario ya que ahora el método no se basará en una imagen a color sino en una imagen con tonalidades grises. Para un mejor rendimiento, se ha trabajado sobre un fondo blanco y se han colocado máscaras blancas a ciertas partes de la estructura del péndulo, para cambiar el color de la vara a blanco (figura 21). Ahora las referencias son 4 y todas de la misma tonalidad.

Para obtener la imagen en tonalidades grises, dentro del asistente de visión, se seleccionan las funciones de procesamiento tituladas "Color" que anteriormente fueron utilizadas para generar muestras de color, en esta ocasión nos dirigimos a la herramienta "Color Plane Extraction" la cual permite extraer hasta 3 tipos de planos de una imagen a color, lo importante al elegir alguno de los planos es asegurarse de que el color azul de las referencias no se pierda y que se distinga

lo más posible, de igual manera se busca que las sombras y brillos se pierdan para que no afecten en el trabajo posterior.

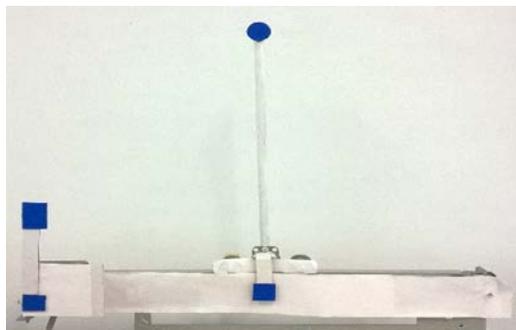


Figura 21 Estructura del péndulo modificada.

A continuación en las funciones de procesamiento buscamos la que se titula “Machine Vision” en la que encontraremos la herramienta Clamp o Rake, la cual realiza una medición en pixeles de la distancia entre dos bordes separados, el objetivo al utilizar esta herramienta es realizar una medición horizontal de los bordes exteriores de la distancia que hay entre la referencia superior izquierda y la referencia en la vara, y otra también de bordes exteriores entre la referencia inferior izquierda y la referencia en la base, en figura 22 se observa la captura de video y se puede apreciar cómo se marca con líneas rojas los bordes que ha detectado y de los cuales se está realizando lo medición.

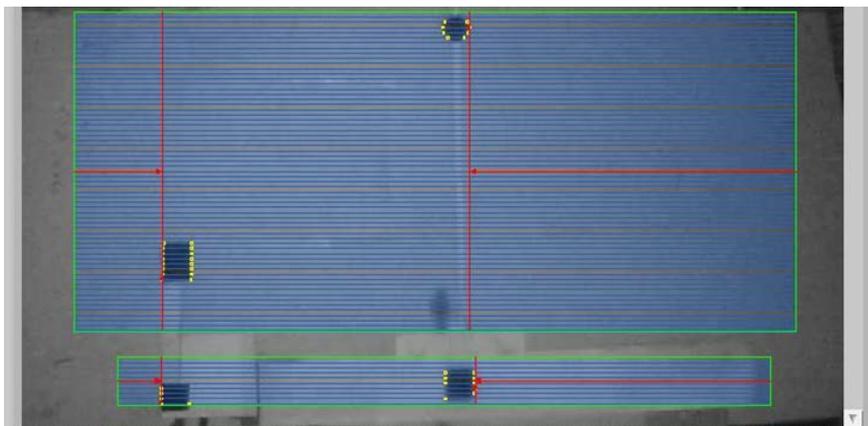


Figura 22 Mediciones de bordes.

En la figura 23 se observa el momento en que se ha inclinado el péndulo para observar si las mediciones arrojadas son congruentes y que no presenten problemas.

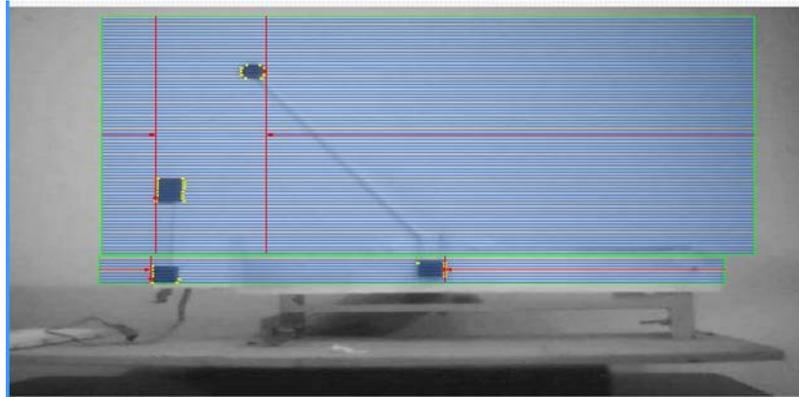


Figura 23 Adquisición de la imagen en el panel frontal.

### Motor a pasos bipolar

En primera instancia se utilizó el motor integrado en el mecanismo de la impresora, este se trata de un motor a pasos bipolar en la figura 24 se puede observar el esquema de un motor a pasos bipolar.

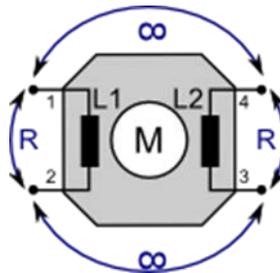


Figura 24 Esquema motor a pasos.

Para hacer funcionar un motor a pasos bipolar hay que alimentar las bobinas en una secuencia específica. En una primera prueba se utilizó la plataforma Arduino y el driver L293D. Se utilizó LabVIEW y se programó un VI para hacer funcionar el mismo motor a pasos pero esta vez utilizando una tarjeta DAQmx.

Para este caso se utilizó un contador y una máquina de estados, además de un control para variar el tiempo en que salta de estado en estado.

## **Motor de corriente continúa**

En un motor de CC mientras más grande sea el potencial eléctrico obtendremos más velocidad y torque, de esta forma lograremos variar la velocidad y torque del motor para las aplicaciones necesarias. En muchas ocasiones no se cuenta con un sistema que varíe el voltaje entre los rangos necesarios, para ello existe otra opción para variar la velocidad y torque sin la necesidad de variar el potencial eléctrico. En este proyecto se utilizó un pequeño motor de imanes permanentes. La modulación por ancho de pulsos o PWM (Pulse Width Modulation) por sus siglas en inglés, es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica, su construcción se basa en la utilización de comparadores, y su aplicación puede ser para el control de motores CC o para convertidores de voltaje. Una ventaja importante del control de PWM sobre el control por variación de voltaje es que se ha demostrado que es más eficiente en términos de calentamiento ya que para hacer girar el motor no utiliza el 100% de la señal si no cantidades que pueden variar de 0 a 100% lo que hace que haya momentos de fracciones de tiempo muy pequeños (en el orden de los mili segundos o inferiores) en que el motor se encuentre girando pero la señal se encuentre en un estado “Off”, esto ocasiona que no se suministre toda la potencia para hacer girar el motor lo que se traduce en menor calentamiento, entonces se entiende que mientras menor sea el ciclo de trabajo menos girará el motor, así que si se tiene un ciclo de trabajo del 100% el motor se encontrará en su límite máximo de velocidad.

La plataforma de desarrollo electrónico Arduino® ofrece en sus tarjetas salidas digitales y PWM, las cuales sustituyen en cierta medida a las analógicas por lo mencionado anteriormente, Arduino ofrece una señal PWM a 16 MHz, segmentado en 255 partes aunado a esto dentro del software LABView se puede programar utilizando el bloque de Arduino. En tres sencillos pasos se puede describir la escritura de una señal PWM en una plataforma Arduino desde LABView:

- Inicializar la placa Arduino con el bloque “INIT”, únicamente se debe de colocar fuera del ciclo “While” y de preferencia en la parte izquierda, por defecto está asignado para una placa Arduino Uno. Si no es la placa con la

que trabajamos, generar una constante en la terminal “Board Type” y seleccionar la placa correcta.

- Colocar el bloque de escritura PWM, asignar el pin de escritura, éste tiene que ser un pin habilitado para escritura PWM que varía entre placa y placa, también asignar un valor entre 0 a 255 para la escritura del PWM.
- Colocar un bloque “CLOSE” fuera del ciclo “While” en la parte derecha y conectar todas las terminales “Arduino Resource” y “error”.

Para el control del motor se utilizaron 2 salidas digitales y una PWM, las salidas digitales indicarán el sentido del motor, mientras que la salida PWM se encargará del control de la velocidad. El integrado L293D se alimenta de 5 volts por lo que para ponerlo en funcionamiento se ha conectado a la pequeña fuente de 5 volts que está incluida en la placa Arduino, este voltaje no es el mismo con el que se alimenta el motor, el actuador en cambio se alimenta del voltaje que se conecta al pin Vmotor, al cual se ha conectado 9 volts.

## Control

Un sistema de control está formado por subsistemas y procesos unidos con el fin de controlar las salidas de los procesos, en este caso la posición de un péndulo es controlada por el movimiento de un motor (figura 25).

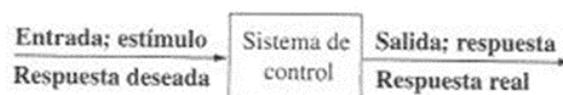


Figura 25 Descripción simplificada de un sistema de control.

Un sistema de control produce una salida o respuesta para una entrada o estímulo dado. La entrada representa una respuesta deseada mientras que la salida es la respuesta real. Dentro de los sistemas de control, éstos se pueden definir de dos tipos, los sistemas de lazo abierto y los de lazo cerrado.

Los sistemas de lazo abierto no pueden compensar ninguna perturbación y simplemente se comandan por la entrada, mientras que los sistemas en lazo cerrado reciben información en retroalimentación que permite corregir las perturbaciones, el objetivo del proyecto es que el sistema logre balancear la barra en todo momento, aunque se presenten perturbaciones, por lo que nuestro sistema se define como de lazo cerrado, con un elemento de retroalimentación visual.

### El control PID

Existen muchas técnicas de control que se pueden aplicar a múltiples plantas dependiendo del tipo de respuesta que se desee, pero el control PID tiene una ventaja, la cual es que no se necesita conocer el modelo matemático de la planta para aplicar el control, debido a esto, se ha optado por la aplicación de un control PID ya que no se contempla el modelo matemático de nuestro sistema. El control Proporcional, Integral y Derivativa (PID) es la estructura de control más usada en el medio industrial (figura 26).

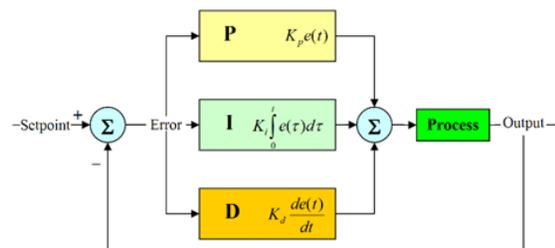


Figura 26 Estructura de control PID.

Ahora que se ha definido un sistema de control y un control PID, se puede definir nuestro sistema con el control PID implementado (figura 27).

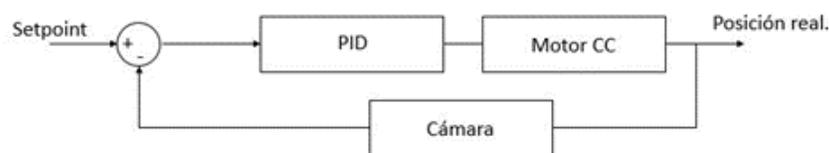


Figura 27 Sistema de control péndulo.

## Asociación de los elementos

Hasta este momento se han probado dos métodos para obtener información numérica de las propiedades del sistema (péndulo), pero mediante la técnica identificación de color, se ha notado mayor lentitud para obtener la imagen del dispositivo debido a las características del equipo con el que se cuenta, además de que debido a esta lentitud, el asistente de visión pierde la referencia del origen del sistema de coordenadas, por lo que detiene el programa e impide continuar momentáneamente su ejecución, en cambio la técnica identificación de bordes trabaja muy bien con la imagen de video y al usarla en este caso no presentó errores que detuvieran el programa, debido a esto se optó por continuar utilizando la técnica de identificación de bordes.

De igual forma se probó utilizando dos tipos de motores, el primero un motor a pasos bipolar, el cual es más difícil de trabajar debido a sus características y el segundo un motor CC mucho más simple. Para continuar, se ha elegido trabajar con el motor CC debido a sus características.

Antes de continuar se explica el procedimiento de toma y procesamiento de imágenes:

- La cámara obtiene la imagen del péndulo en el cual se han colocado 4 referencias.
- El asistente de visión cambiará la imagen de color a una en escala de grises, de donde hará 2 mediciones horizontales.
- La primera medición será desde una referencia fija colocada en el extremo izquierdo de la estructura hasta una referencia colocada en el extremo del péndulo, a dicha distancia la llamaremos d1.
- La segunda medición será desde una referencia fija colocada en el extremo izquierdo del péndulo, hasta una referencia colocada en la base del péndulo, a dicha distancia la llamaremos d2.
- d1 y d2 serán entregados por el asistente de visión para poder utilizarlos como datos de programación.
- Si la diferencia entre estas dos distancias ( $d1-d2$ ) es cero, entonces significa que el péndulo está en equilibrio, si por el contrario la diferencia entre las

distancias es diferente de cero, entonces significa que se ha provocado una perturbación en el sistema y el péndulo está a punto de caer.

- A la diferencia de distancias la llamaremos “x”, este dato es importante ya que mientras mayor sea el valor absoluto de x, el péndulo se encontrara más cerca de caer.
- El dato x será la variable de control, debido a ello esta variable se introducirá a un bloque PID dentro del mismo LABView, este bloque se encargara de el control del motor para que decida si este debe de ir más o menos rápido para tratar de equilibrar el péndulo.
- El motor mueve la cremallera y equilibra el péndulo en posición vertical.

Todos los pasos mencionados anteriormente, están en un bucle infinito, que se repite indefinidamente hasta que se detenga la ejecución del programa.

El asistente de visión entregará las dos distancias, como ya se había mencionado. Las distancias entregadas están en pixeles, al ser éstos de magnitud muy pequeña, al tener una mínima variación en la inclinación del péndulo las distancias variaban a pesar de que el péndulo se encontrara en equilibrio, para darle un poco más de margen a la inclinación del péndulo, las distancias se dividieron entre 5 y las cantidades se convirtieron a enteros para no considerar los decimales, luego de esto se ha realizado la diferencia, en la figura 28 se observa lo anteriormente mencionado.

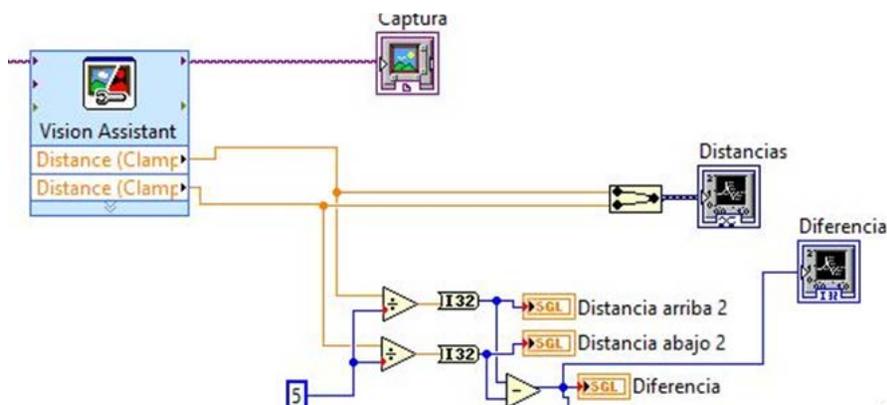


Figura 28 Ajuste del Sistema de visión.

Ahora la diferencia entre las distancias se ha cambiado para obtener su valor absoluto, ya que esta diferencia puede cambiar de signo dependiendo de hacia dónde esté cayendo el péndulo con respecto a la base, esta cantidad se cambiará de signo para obtener siempre valores negativos, debido a que el setpoint (valor deseado) es 0, es decir la distancia  $d_1$  y  $d_2$  deben ser iguales y que es más fácil trabajar con un PID cuando el setpoint es la cantidad más grande que puede alcanzar el sistema.

En el software LABView se coloca un bloque PID, al que se le crea un control para modificar las constantes ( $K_p, T_d$  y  $T_i$ ), también se colocan los límites inferior y superior, (0-255) de la señal de control que posteriormente serán dirigidos a una salida PWM de la placa Arduino (figura 29).

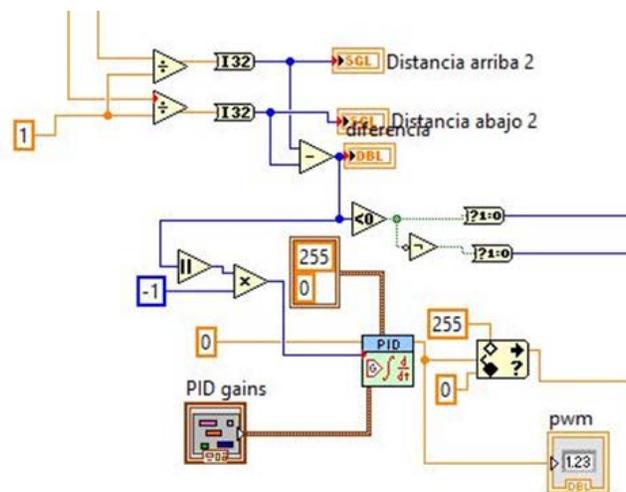


Figura 29 PID en software.

En el panel frontal se han colocado los controles para modificar los valores de las constantes del PID, un botón de paro, un indicador para la distancia  $d_1$ , otro para la distancia  $d_2$ , así como uno que indica que valor de PWM se escribe en la placa Arduino, también se muestran dos gráficas en la parte derecha, que muestran las distancias  $d_1$  y  $d_2$  a través del tiempo y también la diferencia entre éstas (figura 30).



Figura 30 Panel frontal del VI.

## 5. Resultados

Al realizar las pruebas se comprobó el correcto funcionamiento del control del péndulo invertido y aunque la velocidad de respuesta del mismo no fue tan rápida como la esperada, varios factores pudieron influir en este resultado como la velocidad del motor, la altura la barra o el lento procesamiento de la imagen, aun así y ante pequeñas perturbaciones, se logró observar como el sistema trataba de equilibrarse. Durante el desarrollo se cumplió con todos los objetivos secundarios propuestos.

En la figura 31 se observa la gráfica al momento de iniciar el programa, se nota un inicio abrupto donde el sistema se tambalea un poco al no tener datos aun de imagen, posteriormente se estabiliza.

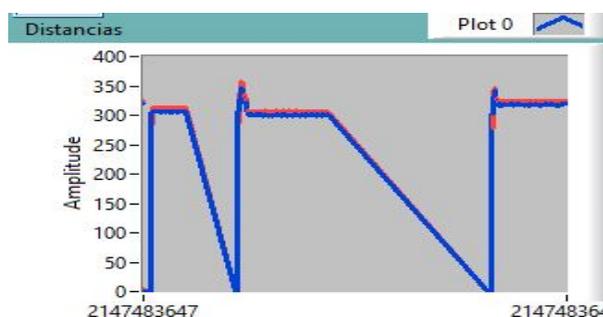


Figura 31 Gráfica al momento de iniciar el programa.

En la figura 32 se observa como ante una perturbación pequeña (línea azul) el sistema se estabiliza después de unos momentos moviendo la base (línea roja).



Figura 32 Estabilización del sistema.

## 6. Resultados

A pesar de que el desarrollo de un dispositivo controlado por visión en este caso un péndulo invertido resultó más complejo de lo previsto, el objetivo principal de este proyecto se cumplió al poder realizar el control del péndulo invertido utilizando como sensor de retroalimentación una cámara para adquirir imágenes y procesarlas en un software. Se rescataron puntos notables como el hecho de poder monitorear variables así como no tener que montar sobre el dispositivo un sensor que añadiría peso y que tal vez no hubiera sido lo más conveniente para el sistema o proceso, sin embargo se puede concluir en base a los resultados obtenidos que es posible mejorar el desempeño del dispositivo siempre que el equipo de cómputo y el elemento actuador (en este caso un motor) sean los adecuados.

Otro punto de interés a mencionar es el hecho de que mediante técnicas de instrumentación fue posible manipular la información obtenida de cada imagen y procesarla para mandar señales que controlen la posición del péndulo con el propósito de que el péndulo sea capaz de mantenerse vertical en todo momento y responder de manera rápida ante las perturbaciones externas. Aunque se implementó y diseñó un control PI, PD y PID para permitir que el sistema fuera más rápido y estable, sin embargo, en este sentido la rapidez de respuesta no fue la que se esperaba. Esto presenta pues, un área de oportunidad de mejora para tener un dispositivo con mejor y más rápida capacidad de respuesta.

## **7. Bibliografía**

- [1] D. Domínguez Álvarez, R. Ulloa Tegoma, D. Valencia García, D. Zaragoza Fernández, Control de un motor por medio de PWM para procesos de velocidad, Tesis de grado en ingeniero en comunicaciones y electrónica, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, México D.F, 2007.
- [2] N. S. Nise, Sistemas de control para ingeniería, 3ª Ed. 2006, Universidad Politécnica del estado de California.
- [3] K. Ogata, Ingeniería de control moderna, 5ª Ed., 2010, Pearson Educación S.A., Madrid.

## **SISTEMA DE SEGURIDAD EN ESTUFAS**

***Arturo Hernández Hernández***

Universidad Politécnica de Querétaro

*arturo.hernandez@upq.mx*

***Sergio Daniel Hernández Miranda***

Universidad Politécnica de Querétaro

*014015174@upq.edu.mx*

***María Blanca Becerra Rodríguez***

Instituto Tecnológico de San Juan del Río

*industrialblanca@gmail.com*

***Fabrizia Celia ArguellesVorrath***

Universidad Politécnica de Querétaro

*014013685@upq.edu.mx*

### **Resumen**

Las estufas son aparatos que desempeñan un papel fundamental en el día a día de todas las familias en el país y en todo el mundo, existen estufas desde las más antiguas como: estufas de leña, estufas a gas, estufas eléctricas. Pero desgraciadamente año con año no siempre hay noticias buenas, pues las notas de accidentes asociados a las distintas maneras de calefacción, que en muchas ocasiones terminan con saldo de personas gravemente heridas o incluso muertas, esto debido al mal uso o descuido que se tienen de las estufas. El hombre para prevenir este tipo de accidentes, ha seguido algunas recomendaciones de seguridad como: revisar con regularidad los calefactores y estufas, las instalaciones eléctricas y de gas, evitar sobrecargar los circuitos eléctricos porque puede favorecer los incendios. Algunos síntomas de más cuidado son: el olor a gas, molestia o ardor de ojos, mareos o problemas para respirar cuando sucede esto se debe apagar la estufa y ventilar el lugar abriendo puertas y ventanas. Este trabajo tiene el propósito de implementar un mecanismo capaz de cortar el gas a

las estufas, cuando se apague la flama durante su uso, buscando evitar la intoxicación y por ende la muerte de las personas.

**Palabra(s) Clave(s):** accidente, estufa, gas.

## **1. Introducción**

El hombre para sobrevivir tuvo que aprender primeramente a cazar que comer y posteriormente a cocinar por necesidad desde la era de piedra no bastaba con saber que comer sino también debía de aprender a cocinar la presa para hacer más nutritiva su comida y así mejorar el sabor de sus alimentos, de ahí que surge la necesidad de crear lo que actualmente se conoce como estufa. Al hombre no le basto tan solo el cocinar sino empezó a idear también como regular el fuego en la estufa y empezó a evolucionar este aparato a través del tiempo. Los componentes principales en evolucionar de las estufas fueron los sistemas de seguridad precisamente por la prevención de accidentes de las personas. Este trabajo se enfocó a un sistema de seguridad en las estufas, el cual se refiere a un dispositivo de seguridad cuya finalidad consiste en evitar el peligro de incendio que existe cuando una estufa de gas vuelca por el motivo que sea, de manera que el dispositivo corta el suministro de gas hacia los quemadores en el momento de producirse dicho vuelco.

Las conocidas estufas de gas de uso doméstico que normalmente son transportables, para lo cual incluyen las correspondientes ruedas, y que presentan un habitáculo para la botella de gas en su parte trasera, así como quemadores en la parte frontal de la estufa.

Estas estufas, cualquiera que sea la causa, pueden volcar estando encendidas, lo cual determina un riesgo de incendio, especialmente si la estufa cae hacia delante, es decir, con los quemadores enfrentados al suelo.

Para lograr los objetivos y evitar los inconvenientes, estos sistemas consisten en un dispositivo de seguridad para estufas de gas, de fácil aplicación y gran efectividad.

Dichos dispositivos están determinados por una pieza que se intercala en el conducto que va de la botella de gas a los quemadores de la estufa. Esta pieza

dispone de una boquilla de entrada de gas y de una boquilla de salida del mismo, estando dichas boquillas comunicadas por un conducto central.

El conducto central presenta un ensanchamiento perimétrico en su parte media que sirve de alojamiento a una bola o cuerpo esférico de menor diámetro que el referido ensanchamiento pero de mayor diámetro que la boquilla de salida de la pieza. El ensanchamiento del conducto de la pieza va perdiendo grosor mediante una rampa o cavidad tronco-cónica que comunica con la boquilla de salida, de manera que cuando la pieza o dispositivo de la invención se encuentra en posición horizontal, la boquilla de entrada y la de salida se encuentran comunicadas permitiendo el paso del gas, mientras que si la referida pieza se encuentra en posición vertical, la bola o cuerpo esférico cae en la cavidad tronco-cónica obturando la boquilla de salida y por lo tanto impidiendo el paso del gas. Así, cuando la estufa se encuentra en su posición vertical de uso, el dispositivo está en disposición horizontal permitiendo el paso del gas hacia los quemadores, mientras que si la estufa cae hacia delante el dispositivo queda en posición vertical y se produce el corte del suministro del gas. Esta caída hacia delante de la estufa es la que se produce con mayor facilidad y la que presenta mayor peligro, por lo que el dispositivo descrito es suficiente en la aplicación más habitual. No obstante, se ha previsto la posibilidad de cortar el suministro de gas ante cualquier tipo de caída, para lo cual hay que conectar en serie cuatro piezas como la descrita y orientadas en los cuatro sentidos posibles de caída, es decir, hacia delante, hacia atrás y hacia los dos laterales. También es posible realizar el dispositivo con dos cavidades tronco-cónicas, una en la parte delantera comunicada con la boquilla de entrada, con lo que dos de estos dispositivos orientados perpendicularmente entre sí y conectados en serie cubrirán los cuatro sentidos posibles de caída, aunque en este caso el dispositivo tiene que constar de dos piezas acopladas para poder introducir la bola o cuerpo esférico de su interior.

Este trabajo soluciono una necesidad creada por el hombre basándose en antecedentes de sistemas de seguridad en estufas y sus principios para poder innovar y mejorar la calidad de lo que ya fue inventado.

## 2. Desarrollo

Debido a los múltiples accidentes que pasan en los hogares, por descuidos y entre los principales se encuentran las muertes por intoxicación con dióxido de carbono ya que regularmente las personas dejan calentando en la estufa algunos alimentos pero debido a diferentes circunstancias la flama se apaga sin tener ningún medio de seguridad que ayude a reducir este tipo de riesgos, dada las circunstancias de riesgo surgió la necesidad de abordar en este trabajo un mecanismo de seguridad que ayude a evitar los accidentes comentados con anterioridad.

### Válvula de apertura y cierre para el paso de gas

En este trabajo la válvula que se utilizo fue la “Esfera soldar de baja presión”. (figura 1).



Figura 1 Válvula  $\frac{3}{4}$ ".

Este tipo de válvula se utilizó principalmente porque su funcionamiento es de los más comunes o más conocidos, además de ser el sistema que la mayoría de las estufas maneja, también porque facilita la realización de las pruebas por ser la más práctica y factible de conseguir.

Además se le conoce a esta válvula como válvula de alivio de seguridad, por el alivio de presión o de seguridad de presión. Como su nombre lo indica, esta válvula además de ser muy empleada, asegura una resistencia a la presión y de alta seguridad. Trabajar con gas es un tema complejo, por lo que se buscó materiales y elementos que pudieron resistir y reducir cualquier falla y error en estos.

Se puede definir como un dispositivo que automáticamente sin otra asistencia de energía que la del propio fluido implicado, descarga fluido para evitar que se

exceda una presión predeterminada y que fue diseñada para que vuelva a cerrar y se evite el flujo adicional de fluido después de haberse restablecido las condiciones normales de presión.

Esta válvula fue ideal para acoplarse en todo tipo de estufas y así poder obtener la solución a un problema de la vida real en los hogares [1].

## Termopar J

El termopar industrial ha utilizado fue de tipo J, que está hecho de hierro, con el cual al ver sus especificaciones de rango de temperatura de  $-270^{\circ}$  a  $1200^{\circ}\text{C}$ , se pudo ver que es recomendable para el tipo de atmosfera que se necesita, la cual es un tanto variante por el constante uso de fuego y aparatos electrónicos. Su principal inconveniente fue la rápida oxidación que sufre si se excede de  $550^{\circ}\text{C}$ , lo cual no es problema para el trabajo desarrollado para este sistema de seguridad pues no se espera llegar a tales temperaturas [2] (figura 2).

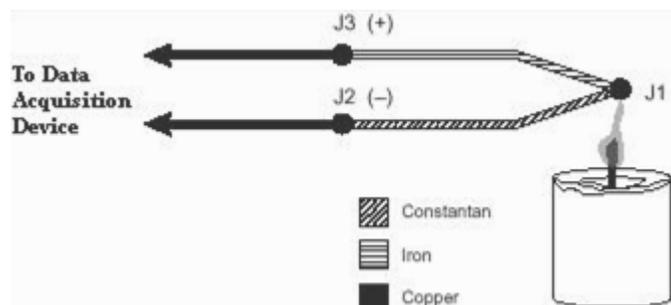


Figura 2 Termopar tipo J.

## Selección del motor

La selección del motor utilizado fue uno de los retos más grandes que presento este proyecto, pues en base a la corriente que este produjo y consumió, se realizaron todos los cálculos previos y posteriores para que el circuito funcionará adecuadamente.

El motor que se utilizó fue de un motor eleva vidrios de 12 Volts. Es un motor de corriente continua con reductor de 12 V y 95 revoluciones por minuto (rpm), con un torque nominal de 9,5 kg-cm y 30 kg-cm a máxima eficiencia. Este motor de

media velocidad destacado por su reducido consumo y buen funcionamiento. Especialmente indicado para aplicaciones que requieren una velocidad y potencia media [3] (figura 3).



Figura 3 Motor 12 V.

Este motor se utilizó durante el primer ciclo de la carrera de mecatrónica y es con el que más sea familiarizado para las prácticas que se realizaron además de tener un buen funcionamiento, muestra una estructura excelente y los rangos de velocidad tan aptos al desarrollo de este trabajo.

Para el diseño de este sistema de seguridad, es importante mencionar que se necesitó integrar un motor que regule y trabaje adecuadamente con la corriente monofásica, que comúnmente se encuentra en los hogares y soporta 220 V.

### **Etapa de potencia**

A continuación se mostrará la simulación del circuito de la etapa de potencia (figura 4).

Se elaboró el diseño y construcción de la etapa de potencia la cual consistió en realizar por medio de un software (LiveWire) el diseño funcional, donde se mostró como debe de ir conectado el circuito de tal manera que logre hacer girar el motor a tiempo, con la interfaz de la programación. En esta etapa se realizaron varias pruebas que se describirán más adelante, ya existían variables, buscando reducir el error se utilizando un promedio y poder tener un rango.

El circuito de potencia real quedo de la siguiente manera (figura 5).

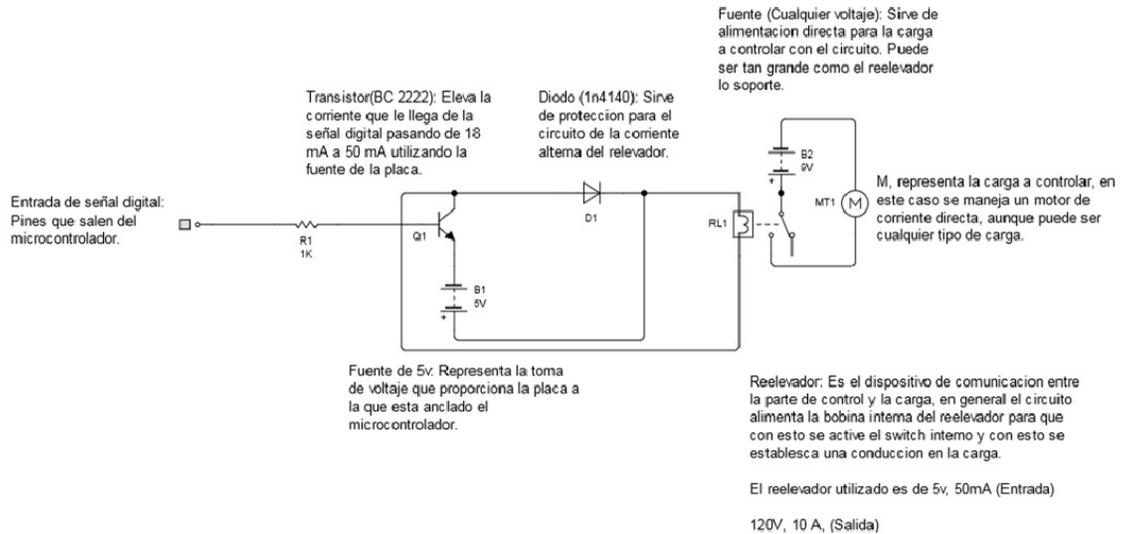


Figura 4 Etapa de Potencia Circuito.

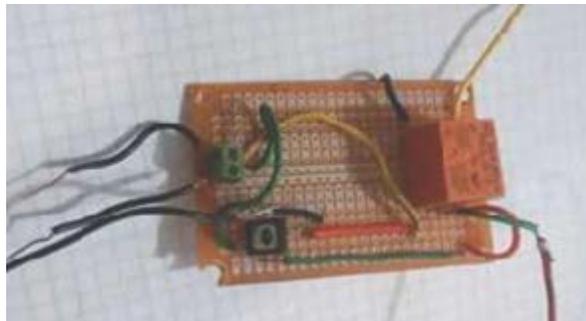


Figura 5 Etapa de potencia construida.

## El diseño de programación en periféricos (ARDUINO)

El diseño de la programación se realizó en Arduino, ya que es una herramienta fácil de manejar y que es muy conocida en el medio profesional, fácil de implementar y de conectar a los diferentes tipos de circuitos. La parte de programación en este trabajo consistió en determinar la temperatura con la que se trabajó, el tiempo de cambio y el movimiento del motor para que de esta forma se pudiera conectar todo el circuito y hacerlo funcionar (figura 6).

## Diseño en SolidWorks

El diseño se realizó en SolidWorks, fue la creación de la estufa y se simuló todo el sistema de potencia y conexión dentro de la caja lateral como se muestra (figura 7).



Figura 6 Conexión con sensor de temperatura.



Figura 7 Vista de la estufa.

### **Pruebas de funcionamiento del sistema**

Las pruebas se llevaron a cabo desde el hogar, ya que al tratar el tema del gas es un elemento difícil de manejar y conseguir ya que puede ser peligroso. Para poder establecer un parámetro de cambio de temperatura se realizaron muestreos a diferentes horas del día y con diferentes condiciones ambientales. Para decretar el cambio de temperatura y poder mandar una señal para el cierre de la válvula, se modeló una ecuación diferencial de primer orden en la que se estableció la temperatura mínima obtenida de los muestreos antes realizados y la variación que existe en un periodo de 10 segundos.

Las pruebas de funcionamiento tuvieron una larga duración, debido a la temperatura, así como el factor de temperatura ambiente el cual no se puede controlar.

Basados en la Ley de enfriamiento de Newton, ecuación 1.

$$\frac{dT}{dt} = k(T - T_m) \quad (1)$$

Donde  $T_m$  = Temperatura Ambiente

$$\int \frac{dT}{(T - T_m)} = k \int dt \quad (2)$$

$$\ln(T - T_m) = kt + C \quad (3)$$

$$T(t) = Ce^{kt} + T_m \quad (4)$$

Aplicando las condiciones iniciales:

$$T(0) = 130^\circ\text{C}$$

$$T_m = 18.6^\circ\text{C}$$

$$130 = Ce^{k0} + 18.6$$

$$C = 130 - 18.6$$

$$C = 111.4$$

$$T\left(\frac{1}{6}\right) = 103^\circ\text{C}$$

$$(1/6=10\text{segundos})$$

$$103 = (111.4) \left( e^{\frac{k}{6}} \right) + (18.6)$$

$$\frac{103 - 18.6}{111.4} = e^{\frac{k}{6}}$$

$$k = \ln\left(\frac{422}{557}\right)(6)$$

$$k = -1.66536$$

Así se obtiene la solución particular

$$T(t) = 111.4(e^{-1.66536t}) + 18.6$$

El tiempo dada una temperatura por el sistema propuesto se modelo con esta ecuación. Ahora:

$$T(t) = 111.4(e^{-1.66536t}) + 18.6$$

$$\frac{T(t) - 18.6}{111.4} = (e^{-1.66536t})$$

$$\ln\left(\frac{T(t) - 18.6}{111.4}\right) = -1.66536t$$

$$t = \frac{\ln\left(\frac{T(t) - 18.6}{111.4}\right)}{-1.66536}$$

El tiempo dada una temperatura por el sistema propuesto se modelo con esta ecuación.

Es importante hacer mención de que las pruebas realizadas para generar las ecuaciones, se realizaron directo en una estufa. Es importante mencionar que se necesita conocer el torque del motor, para determinar si este es suficiente para poder cerrar la válvula:

- Como se sabe el Torque o par motor, es el nombre que se da a las fuerzas de torsión de un motor.

- El torque es la capacidad de desarrollar fuerza sobre un eje, es decir, es la fuerza que ejerce sobre algo que gire o sobre algo para hacerlo girar.

¿Por qué calcular potencia?

Porque la relación entre TORQUE y POTENCIA está en la velocidad angular de aquello en donde se considere el análisis.

Si es en el eje del motor será:

$$\dot{W} = M \omega$$

Siendo:

$\dot{W}$  = Potencia

$M$  = momento de fuerza o torque

$\omega$  = velocidad angular =  $\pi n/30$

Se sabe que la potencia es el resultado del producto entre el voltaje y la corriente.

Por lo tanto se obtienen datos del motor.

Voltaje= 12 V

Corriente=1.4 A

$$\dot{W} = V * I$$

Ec. (5)

$$\dot{W} = 12 V * 1.4A$$

$$\dot{W} = 16.8 W * \left(\frac{1 hp}{745.699872 W}\right)$$

$$\dot{W} = 0.0225229 hp$$

Una vez conocida la potencia del motor se prosiguió a calcular el torque de este.

Recordar:

$$\Theta_{\text{motor}} = 95 \text{ rpm} = 95(2\pi)/60 = 9.9484 \text{ rad/s}$$

$$M = \frac{\dot{W}}{\omega} \quad (6)$$

$$M = 2.2669 \times 10^{-3} N.m$$

Este es el torque que genera el motor, ahora para saber si es suficiente para que haga girar la válvula, necesita ver las especificaciones de la válvula y ver si el torque es suficiente.

### 3. Resultados

Los resultados obtenidos en el desarrollo del sistema de seguridad para uso eficiente y eficaz en estufas fueron prometedores, satisfactorios y cumplieron con todas las expectativas que se esperaban.

Se obtuvieron resultados positivos en la parte de programación de periféricos, en donde se implementó correctamente lo aprendido sobre Arduino, en electrónica de potencia en donde se implementó de manera correcta en los términos técnicos y se puso en práctica la simulación hasta contrastar con lo real. Este fue el principal reto a vencer y logro, ya que como su nombre lo indica va a ser el potencial y base de todo el desarrollo. En cuanto a los cálculos, se implementaron ecuaciones diferenciales en donde por medio de ecuaciones de primer orden separables se pudo conocer el comportamiento de la temperatura.

Como resultado del sistema de seguridad en base a ecuaciones diferenciales se encontró que la temperatura en cierto tiempo por el sistema propuesto y se modeló con la siguiente ecuación:

$$T(t) = 111.4(e^{-1.66536t}) + 18.6$$

Así mismo el tiempo dada por la temperatura del sistema de seguridad fue modelado por la ecuación:

$$t = \frac{\ln\left(\frac{T(t) - 18.6}{111.4}\right)}{-1.66536}$$

Esto con base a los resultados obtenidos de cambio de temperatura (27 °C en 10 s) al extinguirse la llama. En general los resultados obtenidos fueron satisfactorios.

### 4. Discusión

Existen sistemas de seguridad en estufas, pero el costo de los mismos es muy excesivo, algunos sistemas que detectan dióxido de carbono, necesitan alguna concentración considerable del mismo, para activar el cierre del suministro de gas. Este dispositivo de seguridad resulta muy eficiente debido a que sin importar la

temperatura existente en el ambiente, el sistema realiza una comparación entre la posición de la perilla y la temperatura del exterior, haciendo así en caso de ser necesario mandar una señal a un control, para activar el motor y este realice el cierre de la válvula de seguridad, que corta el suministro de gas a la estufa, lo que lo vuelve un sistema práctico y económico.

## **5. Conclusiones**

Después del análisis, desarrollo, etapas de prueba y funcionamiento se llegó a la conclusión de que el proyecto llamado “Sistema de seguridad en estufas” cumplió con su objetivo de cortar el flujo de gas a través de una válvula situada en la toma principal del fluido de la estufa, la cual consistía en detectar temperaturas menores a la temperatura de trabajo de acuerdo a la posición de la perilla de encendido, para evitar fuga, desperdicio o intoxicación.

Desde un principio, se pensó que era un proyecto difícil de realizar, ya que trabajar con gas no es sencillo, existieron muchas complicaciones pues para las medidas y pruebas se tuvo que interactuar entre la estufa y el sensor de temperatura. Fue un reto mezclar cálculos de dos fuentes diferentes, así como las variaciones de la temperatura en el ambiente, para lograr que con ambas funcionaran a la perfección, pero se logró el objetivo.

## **6. Referencias**

- [1] Home Depot. (2012). Valvulas. 2014, de home depot. Sitio web: <http://www.homedepot.com.mx/comprar/es/coapa-del-hueso/valvula-esfera-soldar-baja-presion-3-4>
- [2] OMEGA (2006). Sensor termopar. 2010, de Omega global Sitio:<http://es.omega.com/prodinfo/termopares.html>
- [3] Super robotica. (2002). Motores funcionales. 2015, de Robotica avanzada Sitio web: <http://www.superrobotica.com/motores.htm>

# ARQUITECTURA PARA EL RECONOCIMIENTO DE EMOCIONES BASADO EN CARACTERÍSTICAS FACIALES

***Elsa Irene Herrera Santiago***

Instituto Tecnológico Superior de Misantla

*eihs\_1683@hotmail.com*

## **Resumen**

La interacción diaria con diferentes seres humanos, es parte del desarrollo integral del ser humano. No solo los gestos faciales codifican nuestro estado de ánimo, sino que las características físicas de nuestra cara nos identifican como individuos únicos en un mundo superpoblado. Pero qué pasaría si diseñáramos una arquitectura capaz de realizar una de las actividades físicas más comunes en nosotros como es el reconocimiento de emociones. En este artículo se presenta la propuesta de una arquitectura capaz de conseguir el reconocimiento de emociones a través de algoritmos especificados a dicho trabajo.

**Palabra(s) Clave(s):** eigenface, emociones, pca, svm, viola&jones, wavelet.

## **1. Introducción**

Actualmente, el reconocer la emoción en una persona es una actividad cotidiana de los seres humanos, resulta hasta simple mirar a una persona y predecir su comportamiento de acuerdo a la emoción que reconocemos en ella. Esta acción puede ser riesgosa y hasta engañosa, ya que una emoción depende de diferentes factores propios de los humanos como son el envejecimiento, expresiones faciales, cambios de iluminación, puntos de vista inducidos por el movimiento del cuerpo y oclusiones. Sin embargo, lo que para el cerebro resulta ser una actividad rápida y sencilla, para la visión artificial resulta ser una operación mucho más compleja basada en estímulos visuales, detalles y matices de los rostros. Desde el siglo antepasado, ha sido interesante construir un sistema automático para la

identificación de individuos a través de su cara, de tal manera que, en 1889 Sir Galton buscaba fórmulas matemáticas para solucionar el problema.

Es por ello que, en los últimos 20 años de estudio, muchos investigadores establecen el reconocimiento de caras y emociones como un tema lejos de resolverse, ya que el replicar esta conducta humana tan cotidiana parece ser un problema computacional muy complicado. Dicho tema ha dado la pauta para un gran número de artículos publicados en revistas y conferencias enfocados al área de visión artificial.

En esta tesis se propone una técnica para el reconocimiento de emociones creando una arquitectura capaz de contemplar métodos específicos para la solución del problema, es por ello que se basará en el Algoritmo de Viola-Jones para la obtención de componentes de una región especificada (en este caso el rostro humano) tales como cejas, ojos, nariz, boca, etc.

Con lo anterior, se aplica una transformada Wavelet, con la cual se pueden crear a base de Wavelet lineales una o varias Wavelets ortonormales fundamentadas en la resolución y las escalas de la imagen para la obtención de un plano preciso. Esto lleva a la elección de un método de análisis de componentes principales o PCA (Sirovich y Kirby, 1987; Kirby & Sirovich, 1990) el cual está basado típicamente en dos fases: formación y clasificación. Pero aunado a esto, se puede constituir un clasificador de emociones como es SVM, que ayuda a clasificar las características específicas conforme a similitudes o diferencias y crear así un vector a comparar con las plantillas creadas de emociones.

Dichos métodos serán los constituyentes de la arquitectura propia a desarrollar para el reconocimiento de emociones, como base de múltiples investigaciones. Sin embargo, no se pretende encasillar su uso a una sola área, sino dar la flexibilidad de implementación en diferentes ramas del área de visión artificial.

## **2. Desarrollo**

La metodología se basa en la propuesta de una arquitectura para el reconocimiento de emociones, ésta se divide en seis etapas (figura 1).

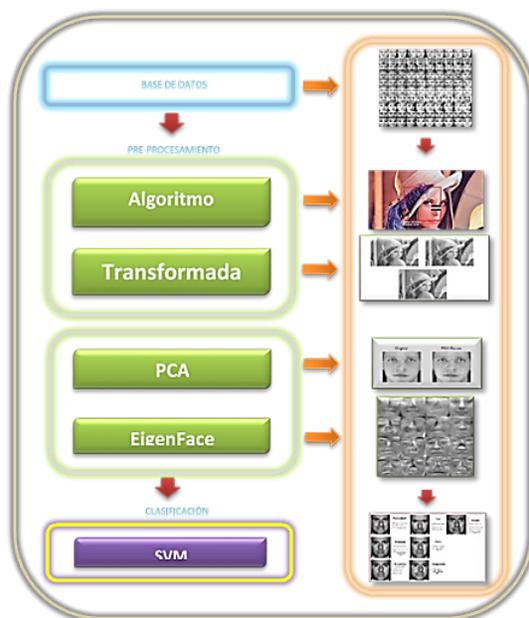


Figura 1 Diagrama de bloques.

La primera etapa se realiza la elección de la base de datos de conocimiento, en donde se tengan diversas muestras de caras o rostros a realizar la detección y clasificación de emociones, se pretende que las imágenes capturen las seis emociones de estudio de una persona, es decir tener seis imágenes por persona.

La segunda etapa es la detección de caras dentro de imágenes. A partir de la detección con el algoritmo Viola-Jones es cuando se puede crear cualquier sistema que analice la información contenida en las caras: ojos, nariz, boca, cejas, y pómulos. La detección facial se encarga de determinar si hay o no alguna cara en una imagen dada y, en caso de que exista, de extraer la localización y el contenido de dicha cara y sus elementos contenidos.

En la tercera etapa se evalúa factores como la iluminación, postura, distancia, simetría y laterabilidad. Detectando la dimensionalidad del rostro de la persona, con la finalidad de establecer a través de una transformada Wavelet un plano de la imagen, dimensionando las características del rostro cambiando texturas y resolución para la obtención completa de elementos y la determinación de una cara y una no cara.

En la cuarta etapa se definen las singularidades dentro de un espacio dimensionado, dichos elementos a identificar serían extraídos por el algoritmo PCA,

obteniendo características de acuerdo a sus similitudes o diferencias. Se establecen características y no diferencias, lo cual conlleva una reducción de la dimensionalidad de la imagen. Por último, se realiza la comparación de plantillas de las emociones con las de un vector basado en características específicas de acuerdo a la descomposición de la imagen.

En la quinta etapa se incorporó a la arquitectura de reconocimiento de emociones un sistema basado en el algoritmo básico de Eigenfaces. Dicho algoritmo será incorporado en la fase de entrenamiento dentro de la arquitectura con el fin de reducir y obtener los componentes que serán los necesarios para la reconstrucción de la imagen y la clasificación de una emoción.

En la sexta etapa se realiza la comparación de plantillas de emociones de acuerdo a un vector creado con características específicas conforme a la descomposición de la imagen. Por último, se crean clases de comparación con características específicas.

## **Selección de Variables**

La base de datos de estudio pertenece a la Universidad Técnica de Munich (Alemania), y está conformada por imágenes de rostros de 18 personas que muestran las 6 emociones básicas definidas por Eckman y Friesen (alegría, sorpresa, enojo, tristeza, desagrado y miedo). Esta base de datos fue generada como parte del proyecto FG-NET (Face and Gesture Recognition Research Network), cada imagen es de 320x240 píxeles a 8 bits y está en formato JPEG. Esta base de datos sobrelleva el paradigma que presentan algunas bases de datos en donde muestran emociones distintas a las naturales, debido a que en esta base de datos se pide a las personas reaccionar lo más natural o comportarse lo más espontáneo posible mientras se les estimula con videos o imágenes.

## **Extracción de características faciales con Viola-Jones**

La segunda fase del sistema de detección de emociones consiste en aplicar el algoritmo de Viola-Jones para desarrollar un detector facial/rasgos en tiempo real, el cual proporciona un alto porcentaje de acierto la imagen y posición de uno de los

ojos, boca, nariz y pómulo, de los cuales se extraerán las posiciones de los rasgos en ellos.

Primero se establece el obtener la cara de la persona, y para ello se utiliza el algoritmo de Viola-Jones (figura 2), una explicación básica de lo que hace este algoritmo es ésta:

- Se transforma la imagen a escala de grises.
- Recorre la imagen a procesar mediante ventanas de 24x24 pixeles a diferentes escalas.
- Para cada una de estas imágenes obtiene una serie de características, que son los resultados de la diferencia de los valores de sus pixeles entre áreas.

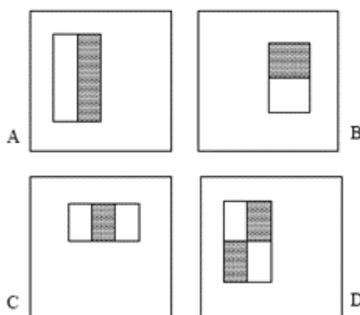


Figura 2 Características utilizadas en el algoritmo Viola-Jones para la detección de caras.

Una vez obtenida la cara del sujeto, se procesa la imagen de la cara para obtener la posición de los ojos, nariz, boca y pómulos. Para ello, se utiliza nuevamente el algoritmo de Viola-Jones anteriormente mencionado pero entrenado en este caso para detectar los rasgos humanos (figura 3).

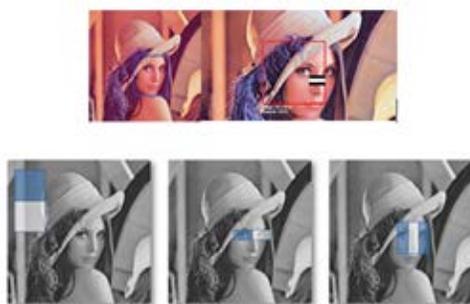


Figura 3 Cara detectada mediante algoritmo Viola&Jones.

## Reducción dimensionalidad imagen con Transformada de Wavelet

Una vez localizados los elementos característicos de la imagen, la tercera fase comprende una técnica usando Transformada Wavelet, la cual ayuda a localizar pequeñas variaciones en imágenes que el ojo humano no detecta a simple vista. Por ello se segmenta la imagen en detalles a diferentes niveles de resolución y orientaciones, sin repeticiones, comenzando a realizar la similitud cuadro por cuadro, localizando las que se asemejen.

Pero esto se obtiene factores determinados por la misma transformada de Wavelet de paquetes, dichos paquetes se basan en una resolución múltiple ortogonormal compuesta por Wavelet lineales, que proporcionan la información espacial, orientación y posición de la imagen contemplando la textura de la misma a diferentes escalas y resolución. Dichos factores son resultados del contexto que se le dará a la imagen de manera física para la experimentación, dicho contexto será determinado por el diseñador, implementando variables como iluminación, postura, distancia, simetría y laterabilidad.

Con lo anterior, el concepto de ruido como ese efecto “indeseable” es el elemento que se debe eliminar de nuestras imágenes, éste consiste en la aparición aleatoria de señales ajenas a la imagen original, especialmente apreciable en las zonas de sombra de la imagen, donde se puede hacer visible la separación del contexto que rodea, el elemento caro (figura 4).



Figura 4 Discriminación de datos, como entorno del elemento cara, por medio del cambio de texturas de la imagen.

Tomando lo anterior, se puede dar respuesta al por qué se utilizan los Wavelets de Morlet para la detección de rostros en este trabajo, y es que está en el hecho de

que son buenos extractores de características de las imágenes, forman una especie de firma del rostro, ya que se basan en la respuesta de cómo las células de la corteza visual tienen campos receptivos, las cuales son pequeñas regiones altamente estructuradas; investigaciones por parte de los científicos Hubel y Wiesel describieron a esas células como detectores de bordes, algunas investigaciones más recientes como la hecha por Jhones y Palmer mostraron que el comportamiento de la respuestas de estas células en los gatos, correspondían a medidas locales en la frecuencia. También se notó que la respuesta dependía de la frecuencia y orientación del campo visual. En los experimentos hechos por Jhones y Palmers, la respuesta de estas células primarias fue medida con electrodos, mientras que los campos receptivos de estas células primarias fueron medidos por proyectar estímulos parecidos a un punto en una ventana homogénea. En otro trabajo, dos científicos Pollen y Ronner (1974) examinan la relación de fase entre células adyacentes de la corteza visual de los gatos, ellos concluyen que las células de un par de células adyacentes tienen ciertas simetrías definidas por frecuencias similares, magnitudes similares, y especificaciones similares de las direcciones: Una de ambas tiene simetría par y otra simetría impar. Esto permite modelar ambos campos receptivos de los pares de células por funciones de valor complejo.

Sin embargo, el algoritmo es muy limitado, pues sólo trabaja con imágenes de tamaño pequeñas, y busca rostros con una medida estándar, por lo tanto, tendrá mal desempeño en imágenes grandes, también tendrá mal desempeño si se buscan localizar imágenes con rostros muy grandes, o imágenes con rostros muy pequeños. Se puede seguir investigando para proponer un algoritmo más robusto que busque las áreas candidatas a ser rostro, pero en imágenes a diferentes niveles de resolución para poder reconocer rostros pequeños y rostros muy grandes (figura 5).

## **Obtención de Componentes Principales con PCA**

El éxito de esta arquitectura para el reconocimiento de emociones depende fuertemente de los elementos utilizados para representar las imágenes para su

posterior clasificación. El patrón que represente a una imagen debe estar compuesto por los elementos más sobresalientes de ella, lo cual es obtenido en esta cuarta etapa, permitiendo reducir la cantidad de datos usados en el proceso de clasificación, y aumentar la diferencia entre ellas para que actúe como un poderoso discriminante o clasificador. Una de las técnicas más utilizadas para seleccionar un subconjunto de elementos que cumpla con esas condiciones es el Análisis de Componente Principal (PCA), la cual genera un conjunto de vectores ortonormales que maximizan la dispersión entre todas las muestras proyectadas, reduciendo al mismo tiempo su dimensión (figura 6).



Figura 5 Compresión de imágenes con Transformada Wavelet.



Figura 6 Obtención de componentes principales.

## 2.5. Reducción de componentes principales con EigenFace

Tanto la etapa de entrenamiento como la de reconocimiento de la emoción utilizan una base de rostros compuesta por tres conjuntos de imágenes (20 y 40 personas por grupos de prueba) de dimensión  $N \times N$ .

Esta quinta fase consiste del proceso de entrenamiento, la cual conlleva los siguientes pasos:

- Cada imagen es reorganizada como un vector de dimensión  $N^2$  cuyo valor es construido como la concatenación de cada una de las filas de la imagen, formando así una matriz de  $N^2 \times M$ .
- Se obtiene el rostro promedio.
- El rostro promedio obtenido es restado a cada una de las imágenes  $M$  obteniendo un nuevo conjunto de vectores que conforman la matriz de  $N^2 \times M$ .

En este punto se buscan los autovectores de la matriz de covarianza de dimensión  $N^2 \times N^2$ . Estos vectores propios son los vectores ortonormales usados para construir la representación de las imágenes. El tamaño de la matriz hace intratable este paso por el espacio y el tiempo requerido). Para resolver este problema se buscan los autovectores de la matriz de covarianza. Debido a su gran dimensión, éstos deben ser aproximados a través de los vectores propios de la matriz de covarianza reducida.

En este trabajo se propone un nuevo método que consiste en formar una imagen de menor tamaño que permita obtenerlos directamente (figura 7).

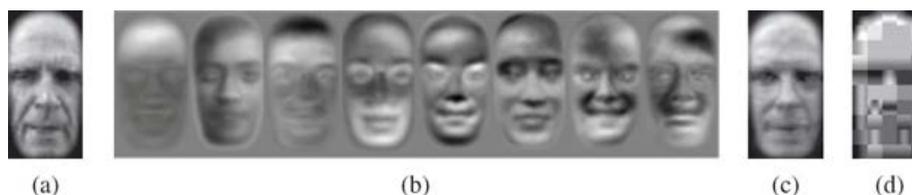


Figura 7 Ejemplo de un eigenface donde se muestran las diferentes clases.

Cada imagen es dividida en bloques de  $P \times P$ . Cada uno de estos bloques se promedia y se obtiene una nueva imagen de  $D \times D$ , que se obtiene de reemplazar cada bloque por su promedio.

Cada imagen es reorganizada como un vector de dimensión  $2D$  cuyo valor es construido como la concatenación de cada una de las filas de la imagen, formando así una matriz de  $D^2 \times M$ :

- Se obtiene el rostro promedio.
- El rostro promedio obtenido es restado a cada una de las imágenes obteniendo un nuevo conjunto de vectores que conforman la matriz.

- Se obtiene la matriz de covarianza de dimensiones  $D2 \times D2$ .
- Se obtienen los autovectores, los que ordenados de mayor a menor según sus correspondientes autovalores, conforman la matriz.
- Se obtiene un patrón.

### **Clasificación de emociones con SVM**

La última fase se basa en las dos ideas fundamentales para la construcción de un clasificador SVM, las cuales son la transformación del espacio de entrada en un espacio de alta dimensión y la localización en dicho espacio de un hiperplano separador óptimo. La transformación inicial se realiza mediante la elección de una función kernel adecuada. La ventaja de trabajar en un espacio de alta dimensión radica en que las clases consideradas serán linealmente separables con alta probabilidad, por tanto, encontrar un hiperplano separador óptimo será poco costoso desde el punto de vista computacional. Además, dicho hiperplano vendrá determinado por unas pocas observaciones, denominadas, vectores soporte por ser las únicas de las que depende la forma del hiperplano.

Una de las principales dificultades en la aplicación de este método radica en la elección adecuada de la función kernel. Es decir, construir la función de transformación del espacio original a un espacio de alta dimensión es un punto crucial para el buen funcionamiento del clasificador.

La forma final de la regla de clasificación para un clasificador binario (dos clases, +1 y -1) son parámetros aprendidos por el clasificador durante el proceso de entrenamiento, por lo tanto, nuestro patrón obtenido con el algoritmo eigenface, será el valor de la función kernel. Si la función es mayor que un umbral entonces la emoción estimada para un punto  $x$  será una +1 y será - 1 en caso contrario.

En el problema del reconocimiento de emociones es típico trabajar con más de dos emociones. Suponiendo que el número de emociones consideradas es  $n$ . Es necesario llevar a cabo una generalización del clasificador binario al caso multiclase. En este caso, se dispone de  $n$  clasificadores, es decir,  $n$  valores de la regla de clasificación para cada objeto. En ambos casos para determinar la emoción que corresponde a cada objeto se realiza una ponderación sobre todas las reglas

de clasificación disponibles. Las SVMs han demostrado ser un método muy efectivo en la clasificación de expresiones faciales espontáneas como describe Bartlett, et al. (2001).

### 3. Resultados

La tabla 1, muestra los resultados del reconocimiento de 6 emociones prototipo.

Tabla 1 Resultados finales.

<i>EMOCIÓN</i>	<i>DATOS DE PRUEBA</i>	<i>IMAGEN</i>	<i>POSITIVOS</i>	<i>FALSOS POSITIVOS</i>	<i>EFICIENCIA</i>
Alegría	24		19	2	95%
	48		39	5	97.5%
Sorpresa	24		19	3	95%
	48		39	8	97.5%
Miedo	24		18	3	90%
	48		37	7	92.5%
Enojo	24		19	1	95%
	48		39	3	97.5%
Disgusto	24		19	2	95%
	48		39	5	97.5%
Tristeza	24		19	1	95%
	48		39	3	97.5%
<b>EFICIENCIA EN MUESTRA DE 20</b>					<b>94.16%</b>
<b>EFICIENCIA EN MUESTRA DE 40</b>					<b>96.66%</b>

En la tabla 1 se consignan los resultados de la arquitectura propuesta. Es de observarse que la expresión de miedo es la más difícil de reconocer con un 92.5%

debido a que en algunas ocasiones ésta se manifiesta como una expresión ambigua. Esta observación concuerda con lo encontrado en el estudio realizado por Ehrlich en donde se expone que la expresión de miedo puede ser una excepción de las clases básicas de emociones derivadas, ya que esta emoción está restringida al proceso de selección forzada mediante el cual se seleccionan las categorías.

#### **4. Discusión**

Como trabajo a futuro se pretende enfocarse en la etapa de reducción de dimensionalidad, puesto que en el tema de reconocimiento de emociones este es el punto medular que afecta en general las arquitecturas.

Dentro de la arquitectura expuesta, se puede mejorar la dimensionalidad de la matriz de confusión generada a partir de los componentes principales obtenidos, de dichos componentes actualmente se realiza una reducción directa de dicha matriz ocasionando la pérdida de información ocasional, sin embargo, si la reducción de la matriz se realiza normalizada, esa pérdida no existiría.

Por lo anterior se pretende obtener un algoritmo EigenFace normalizado y no directo, puesto que optimizaríamos nuestros porcentajes de resultados de acuerdo a cada emoción.

#### **5. Conclusiones**

La creación de una arquitectura segmentada por diferentes algoritmos como son Viola-Jones, Transformada de Wavelet, Algoritmo de Componentes Principales, EigenFace y Máquina de Vector Soporte para el manejo de una imagen, ayuda a la obtención de componentes específicos, descriptivos y característicos que permiten la construcción de rasgos faciales, que alimentaran al clasificador obteniendo con ello el reconocimiento de emociones.

En particular, el estudio de patrones de pixeles es aplicado a las regiones detectadas como ojos por el algoritmo de Viola y Jones. Posteriormente se aplica el análisis de componentes principales o PCA (del inglés Principal Component Analysis) y se seleccionan las características críticas, las cuales son utilizadas

como parámetros de entrada para un clasificador SVM. De esta manera, se logra reducir el número de falsos aciertos/positivos mejorando, por tanto, la tasa de acierto global de sistema.

Gracias a dicha arquitectura, el algoritmo de Viola-Jones, además de ofrecer buenos resultados, ofrece también una tasa de análisis muy elevada, de más de 90% de eficiencia, haciendo del mismo una herramienta útil para sistemas de obtención de características faciales en tiempo real.

En resumen, queda claro que se ha obtenido una importante ventaja en la codificación de la imagen mediante la representación que proporciona la transformada wavelet. No obstante, se ha comprobado que las componentes de alta frecuencia de la transformada wavelet pueden codificarse de forma mucho más burda que los componentes de baja frecuencia sin que aparezcan pérdidas aparentes en la calidad de la imagen. Por ello a diferencia de otros autores, la aplicación de una Transformada Wavelet como parte del pre-procesamiento de la imagen es de ayuda para la minimización de la imagen. Quizás, uno de los grandes problemas de los sistemas de detección de emociones reside precisamente en la capacidad para caracterizar aquello que no corresponde a una emoción. Por ello, se propone usar una máquina de vectores soporte o SVM (del inglés Support Vector Machine) de ocho clases para así evitar dicho problema. Adicionalmente, utilizar las auto-caras para caracterizar las imágenes, este modelo obtiene una tasa de acierto superior al 90%.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Zhao, W.; Chellastra, R.; Rosenfeld, A. y Phillips, PJ (2003). Reconocimiento facial: A Literatura Encuesta, *ACM Computing Surveys*, Vol. 35, No. 4, diciembre 2003, pp 399-458.
- [2] Zhou, S.; Krueger, V. & Chellapa, R. (2003). Reconocimiento probabilístico de rostros humanos de Video, *Visión por Computador y la Interpretación de Imágenes*, Vol. 91, 2003, pp 214-245.
- [3] P. Viola and M. Jones, "Robust real-time face detection". In *Proc. Of IEEE Workshop on Statistical and Computational Thories of Vision*, 2001.

- [4] Coifman, R. R. & Meyer, Y. (1990). Bases ortonormales paquetes wavelet, preparativos para la imprenta.
- [5] Liu C. C., P. y D. Dai Yan H. (2007). Paquetes wavelet discriminante Local coordina para la cara reconocimiento, *Journal of Machine Learning Investigación*, Vol. 8 (mayo de 2007) 1165-1195.
- [6] Sirovich, L. & Kirby, M. (1987). Procedimiento de pocas dimensiones para la caracterización de Rostros Humanos, *Revista de la Sociedad Americana de Óptica A*, Vol. 4 (3), (marzo de 1987), 519 - 524, 1.084-7.529.
- [7] Yang, Y., Lu, B. L. (2006). Predicción de proteínas subcelulares Multi-Lugares con Min-Max Modular Vector Apoyo a máquina, en *Memorias del Tercer Simposio Internacional en redes neuronales (ISNN 2006)*.
- [8] Guevara Díaz J. (2013). Detección de rostros por medio de las wavelets de morlet.
- [9] Guevara M. L., Echeverry J. D. & Ardila Urueña W. (2008). Detección de rostros en imágenes digitales usando clasificadores en cascada.
- [10] Serrano A, Conde C., De Diego I. M., Cabello E., Bai L. & Shen L. (2007). Parallel gabor pca with fusion of svm scores for face verification.

# DESARROLLO DE HERRAMIENTAS DE VISIÓN ARTIFICIAL EN MATLAB PARA INSPECCIÓN DE TARJETAS PCB

***Hugo Antonio Méndez Guzmán***

Universidad Politécnica del Bicentenario

*hmendezg@upbicentenario.edu.mx*

***Adrián Martínez González***

Universidad Politécnica del Bicentenario

*amartinezg@upbicentenario.edu.mx*

## **Resumen**

A través de este trabajo se presenta el desarrollo de herramientas de inspección para Matlab basadas en un sistema de visión industrial, así como una propuesta de interfaz de usuario para la configuración de un sistema de inspección en tiempo real, usando como herramienta de adquisición una webcam común para detección de defectos como ausencia o desplazamiento de elementos con respecto a componentes Thru-Hole, así como la detección de corto-circuito, soldadura excesiva, componente sin soldadura, detección de perforaciones, ausencia de componentes y conteo de circuitos integrados SMT. La implementación de este sistema se realiza en Matlab® presentándose una comparativa en funcionalidad con el software In-Sight Explorer® versión 4.9.3.

**Palabra(s) Clave(s):** control de calidad, inspección PCB, visión artificial.

## **1. Introducción**

En los procesos industriales en la región del Bajío, existen empresas dedicadas a la manufactura electrónica para el área automotriz, implementando productos como tableros de control electrónicos, tarjetas electrónicas como sensores para velocidad, estado de puertas, vidrios, control de chispa de encendido, etc.

Para establecer un producto de calidad hacia el mercado, es indispensable la verificación de dichas tarjetas antes de proceder su montaje en los autos para asegurar un funcionamiento óptimo. Sin embargo en el proceso de fabricación y montaje de componentes en tarjetas electrónicas se generan defectos en el proceso ya sea en la colocación de los componentes en el proceso de SMT (Surface Mount Technology) o cualquiera de los procesos siguientes Radial, Pin Inserter, Cut & Clinch, etc [1].

La inspección de tarjetas PCB es de suma importancia dentro del proceso de fabricación y montaje, ya que una vez que los componentes han sido colocados y han pasado por diferentes etapas de soldadura, es momento de que las tarjetas sean programadas. Una vez que el firmware en componentes como microprocesadores, FPGA's o memorias es programado, se aplica el conformal haciendo imposible la programación de las mismas si hubo un fallo intermedio en los procesos anteriores.

Actualmente en empresas del área automotriz en la región del Bajío existen grandes pérdidas en scrap debido a que la maquinaria es prácticamente automática y no permite la completa manipulación del operador. En diversas ocasiones el operador no se percata de que a la tarjeta le falta algún componente, o que alguno de estos no está colocado de manera correcta. También se presentan pérdidas en el proceso de programación de circuitos integrados de montaje superficial, cuando no existe un sistema de inspección.

El presente trabajo está enfocado en la generación de un prototipo de inspección de defectos para tarjetas electrónicas a través de procesamiento digital de imágenes, ofreciendo una solución a dichas problemáticas por medio de un sistema de inspección de bajo costo.

## **2. Marco Teórico**

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

Para el fin específico de nuestra aplicación se utilizaron las herramientas de Luminosidad, Recuento de pixeles, Blob, Margen, Círculo y Recuento de patrones.

## Herramientas Presencia-Ausencia

### Luminosidad

Esta herramienta determina si una característica está presente o ausente basándose en la intensidad promedio de escala de grises (es decir, brillo). Comunica una aceptación si la puntuación del área de la región se encuentra dentro de los límites o un rechazo si está fuera de ellos. Matemáticamente el brillo de una imagen se define con ecuación 1.

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

Donde  $L$ ,  $N(g)$  y  $M$  son el número de niveles de gris contenido en una imagen, número de pixeles en el nivel de intensidad  $g$  y el número de pixeles en la imagen, respectivamente [2].

### Recuento de Pixeles

Determina si una característica está presente o ausente basándose en el número de pixeles claros u oscuros de una región; comunica una aceptación si el número de pixeles de la región está dentro de los límites o un rechazo si esta fuera de ellos. El recuento de pixeles claros y oscuros se pueden expresar matemáticamente con ecuaciones 2 y 3.

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

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

Con

$$P(i) = \begin{cases} 1 & \text{if } f(i) \geq T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

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

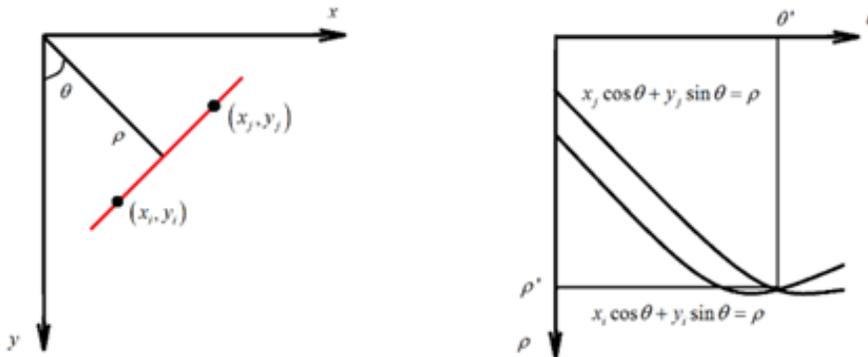
### Margen

La función de esta herramienta ayuda a determinar si hay márgenes lineales sobre nuestra pieza de inspección presentes o ausentes y comunica una aceptación si la característica de margen está dentro de los límites o mostrará un rechazo si está fuera de ellos o la característica no se encuentra sobre la pieza.

Un margen lineal se forma cuando hay un cambio brusco de brillo en una imagen, es decir un borde. Para hacer la detección de estos es necesario usar la transformada de Hough en su representación polar de una línea, ecuación 5.

$$x \cos \theta + y \sin \theta = \rho \quad (5)$$

Tal que dos puntos que pertenecen a una línea corresponden a una intersección en el plano  $\rho\theta$  [3], como se muestra en la figura 1.



a) Parametrización de líneas en el plano  $xy$ .      b) Curvas senoidales en el plano  $\rho\theta$ .

Figura 1 Correspondencia intersección punto  $(\rho', \theta')$  y línea formada por  $(x_i, y_i)$  y  $(x_j, y_j)$ .

Siendo así cada pixel de un borde tiene una representación en el plano  $\rho\theta$ , y por lo cual una línea formada por un cambio de brillo tiene múltiples intersecciones en dicho plano, y por lo tanto una línea recta en el plano  $\rho\theta$  está localizada donde hay mayor incidencia de intersecciones por cada pixel y su representación polar. Se

puede apreciar en la figura 2 como un borde está ubicado en donde los pixeles del plano  $\rho\theta$  son más brillantes.

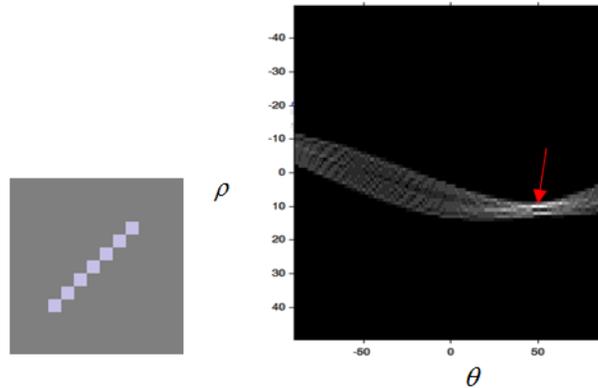


Figura 2 Transforma de Hough del borde de una imagen.

### Círculo

Determina si una característica circular está presente o ausente sobre la pieza de inspección y comunica la aceptación si la característica circular está dentro de los límites o un rechazo si está fuera de ellos o la característica no se encuentra sobre la pieza.

De forma similar que un margen, un círculo es formado por un cambio brusco de brillo pero con un patrón circular. Por lo que para su detección se puede usar una modificación al algoritmo de Hough. Partiendo de la ecuación de un círculo con centro en  $(\bar{x}, \bar{y})$ , ecuación 6.

$$(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2 = \rho^2 \quad (6)$$

Y representando en coordenadas polares un punto en la circunferencia  $(u, v)$  con referencia al plano  $(\bar{x}, \bar{y})$  tal y como se muestra en la figura 3.

$$\begin{aligned} u &= \bar{x} + \rho \cos \theta \\ v &= \bar{y} + \rho \sin \theta \end{aligned} \quad (7)$$

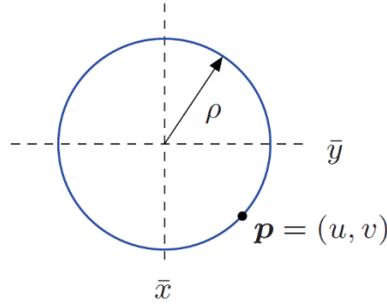


Figura 3 Representación de círculos en 2D.

De tal forma que es posible trazar un círculo de radio  $\rho$  por cada punto  $(u, v)$  en la circunferencia formada por los bordes de la imagen, y por lo tanto la localización del centro de un círculo de la imagen será en aquel lugar donde haya mayor incidencia de intersecciones por cada pixel y su representación polar [4]. Se puede apreciar en la figura 2 como un borde está ubicado en donde los pixeles del plano  $\rho\theta$  son más brillantes. En la figura 4 se detalla la localización del centro de un círculo, a través de la traza y acumulación de intersecciones en la traza de círculos por cada punto  $(u, v)$  sobre la circunferencia original.

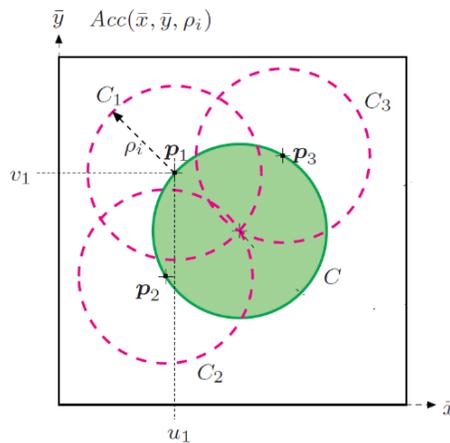


Figura 4 Transforma de Hough para círculos.

### Blob

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

Esta herramienta es muy similar a la de recuento de pixeles, sin embargo, la herramienta de blob una vez que ha umbralizado la imagen elige de entre los objetos localizados (segmentos en blanco dentro de la región de interés ROI verde mostrado en la figura 5) el objeto más relevante de la región. El objeto más relevante de una imagen puede ser elegido por criterios de integridad de contorno o área mayor en pixeles, para nuestro caso por área.

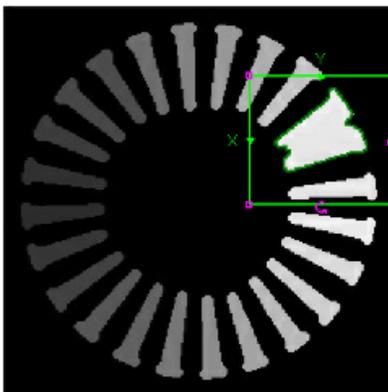


Figura 5 Segmentación por Blob.

### Recuento de patrones

Cuenta el número de características de patrón entrenadas. Comunica el número de patrones encontrados y una aceptación si el número de patrones encontrados está dentro de los límites especificados, o un rechazo si esta fuera de los límites o los patrones no se encuentran.

Para reconocer o clasificar un objeto en una imagen se deben extraer características de interés, para posteriormente usarlas en un clasificador de patrones ya sea para ser contabilizados o clasificarlos. Entre las características que podemos distinguir en una región de una imagen están forma, contorno, textura, tamaño, intensidades, propiedades estadísticas, etc [5].

En el caso específico de los circuitos impresos podemos contabilizar componentes como circuitos integrados (CI) SMT basados en su baja reflectancia, ya que como muestra la figura 6b hay un gran contenido de pixeles alojados en niveles muy bajos de la escala de grises, permitiendo una segmentación de estos aplicando umbralización en estas zonas y por ende la forma geométrica de los CI.

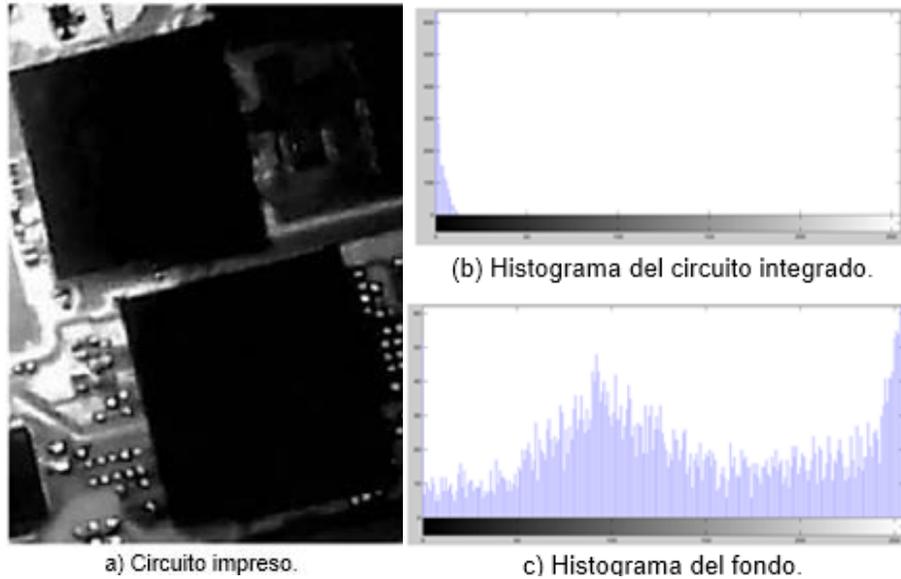


Figura 6 Reflectancia de circuito integrado SMT ante un sistema de iluminación coaxial.

Por otra parte los CI pueden estar en diferentes orientaciones y tamaños en el circuito impreso, por lo que para contabilizarlos es necesario encontrar su forma geométrica tomando en cuenta parámetros invariantes a escala y orientación. Para encontrar su forma geométrica es necesario encontrar características que sean invariantes a la rotación y a la escala tal como los momentos de Hu.

Los momentos geométricos se definen como:

$$\mu_{pq} = \iint (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y) dy dx \quad (8)$$

Donde  $\mu_{pq}$  es el momento geométrico de orden  $(p + q)$ ,  $f(x, y)$  es el valor del pixel en la posición  $(x, y)$  de la imagen y  $(x - \bar{x})$  es el centroide de la misma. Partiendo de estos momentos podemos obtener  $\mu_{pq}$ , un momento de orden  $(p+q)$  que es invariante a la escala [6].

$$\mu_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^{\frac{p+q}{2}}} \quad (9)$$

Sus siete momentos invariantes son:

$$\begin{aligned}\phi_1 &= \mu_{20} + \mu_{02} \\ \phi_2 &= (\mu_{20} + \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2 \\ \phi_3 &= (\mu_{30} - 3\mu_{12})^2 + (3\mu_{21} - \mu_{03})^2 \\ \phi_4 &= (\mu_{30} + \mu_{12})^2 + (\mu_{21} + \mu_{03})^2 \\ \phi_5 &= (\mu_{30} - 3\mu_{12})(\mu_{30} + \mu_{12})((\mu_{30} + \mu_{12})^2 - 3(\mu_{21} + \mu_{03})^2) + (3\mu_{21} - \mu_{03})(\mu_{21} - \mu_{03})(3(\mu_{30} + \mu_{12})^2 - (\mu_{21} + \mu_{03})^2) \\ \phi_6 &= (\mu_{20} - \mu_{02})((\mu_{30} + \mu_{12})^2 - (\mu_{21} + \mu_{03})^2) + 4\mu_{11}(\mu_{30} + \mu_{12})(\mu_{21} + \mu_{03}) \\ \phi_7 &= (3\mu_{21} - \mu_{03})(\mu_{30} + \mu_{12})((\mu_{30} + \mu_{12})^2 - 3(\mu_{21} + \mu_{03})^2) - (\mu_{30} - 3\mu_{12})(\mu_{21} + \mu_{03})(3(\mu_{30} + \mu_{12})^2 - (\mu_{21} + \mu_{03})^2)\end{aligned}$$

Tal que un CI sin importar su tamaño y orientación tendrá momentos invariantes muy similares.

Finalmente dado que la segmentación puede producir objetos con geometrías distintas, se pueden discriminar objetos en la imagen a través de la comparación de forma geométrica por medio del cálculo de la distancia Euclidea [7], pero usando en lugar de los objetos, la comparación entre sus momentos invariantes tal que:

$$d_E^2(\phi_x, \phi_y) = \sum_{k=1}^7 (\phi_x^k - \phi_y^k)^2 \quad (11)$$

Donde  $\phi_x$ ,  $\phi_y$  son los momentos invariantes del patrón y un objeto analizado en la imagen, de esta forma para aquellos objetos que presenten la menor distancia con respecto al patrón entrenado serán reconocido y contabilizados.

### 3. Desarrollo

El funcionamiento de un sistema de verificación por visión puede representarse gráficamente como una secuencia ordenada de pasos, desde la calibración (configuración de herramientas), hasta el análisis ON-LINE y visualización de resultados (figura 7).

El proceso comienza con la captura de una imagen de prueba, asumiendo que esta es una pieza OK y con la cual se ajustan las herramientas necesarias para detectar cada uno de los fallos en tarjetas que serán verificadas posteriormente. Para cada falla se debe asignar un ROI y la herramienta adecuada para su análisis, tal que

para la verificación de múltiples errores solo será necesario agregar más herramientas como una lista ordenada de parámetros en la tarea de inspección.

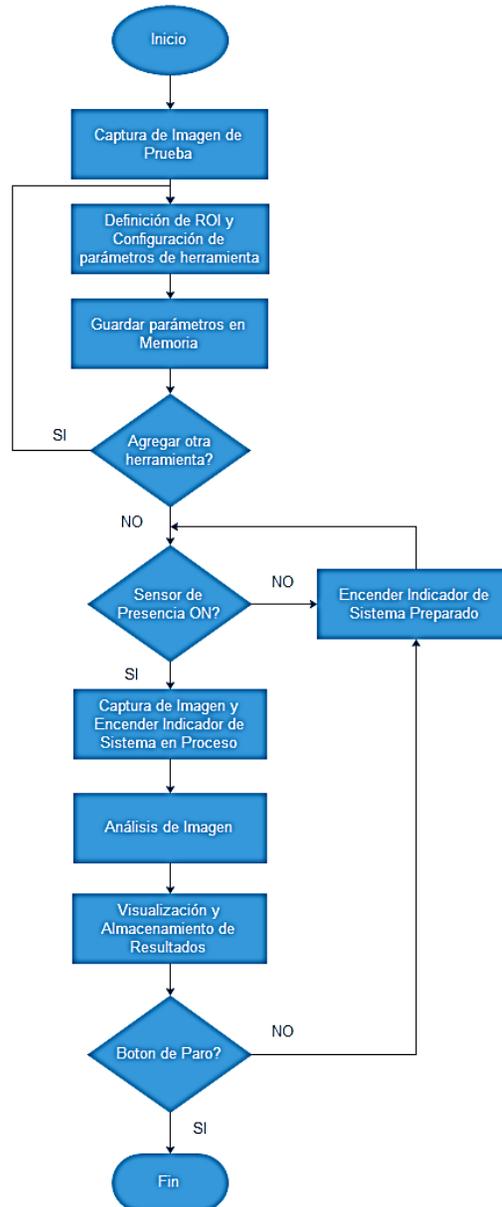


Figura 7 Proceso de verificación por inspección visual.

Una vez asignada la lista de verificaciones el sistema entra en marcha por la detección de una pieza a través de un sensor de presencia, el cual envía una señal digital al sistema de adquisición para indicar el inicio de la etapa de análisis de la

imagen. Este proceso continua de forma indefinida inspeccionando cada una de las piezas que se introduzcan en el sistema y mostrando en pantalla los resultados de cada inspección, que a través de la comparación de características físicas con la imagen patrón, el sistema puede generar una señal digital usada como elemento activador de un sistema mecánico de rechazo ante la detección de una pieza NO OK.

#### 4. Resultados

##### **Detección de defectos en tarjetas PCB para componentes Thru-hole y SMT en base a herramientas Presencia-Ausencia**

Acorde a las características antes descritas en el marco teórico podemos definir entonces los criterios para la búsqueda de defectos en tarjetas PCB.

Entre las características más distinguibles en cuanto a la presencia o ausencia de un componente se encuentran regiones con cambio de luminosidad drástico, de oscuro a claro o viceversa alrededor de una zona específica (contorno); estas regiones pueden ser detectadas por la búsqueda de círculos o márgenes, tal y como se muestra en la figura 8.

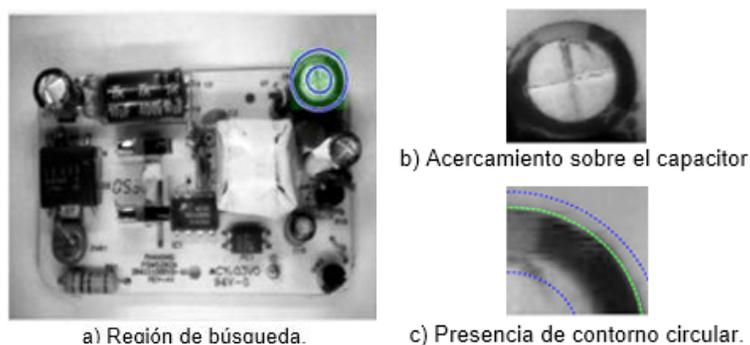
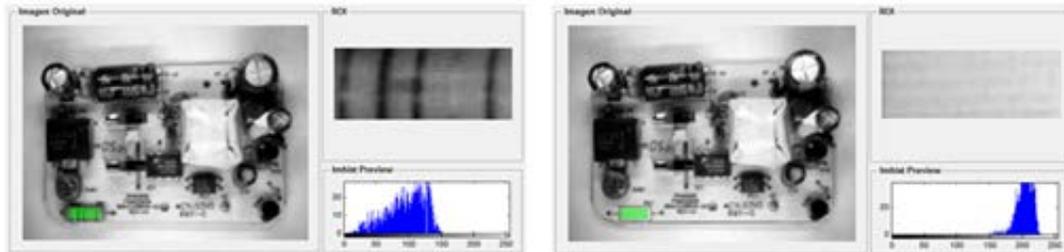


Figura 8 Detección de capacitores en base a presencia de contornos circulares.

Así mismo existen cambios en la luminosidad en una región que modifica la distribución de niveles de intensidad sobre la imagen, modificaciones presentes en defectos como desplazamiento total o parcial de componentes, ausencia de

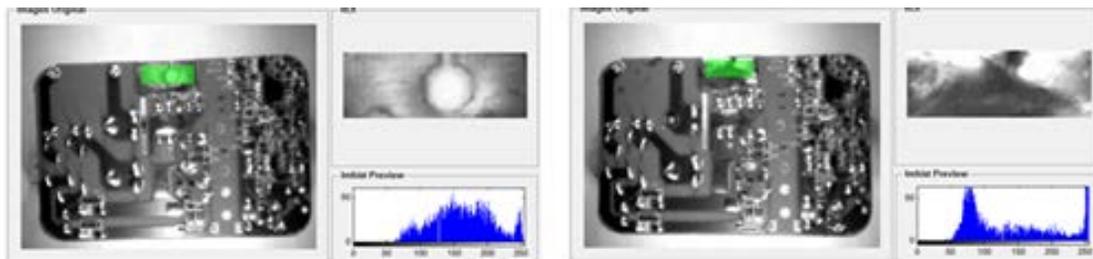
resistores (figura 9), relevadores, puentes rectificadores, transformadores, etc., todos ellos componentes Thru-Hole.



a) Intensidad sobre un resistor.      b) Cambios en distribución de histograma.

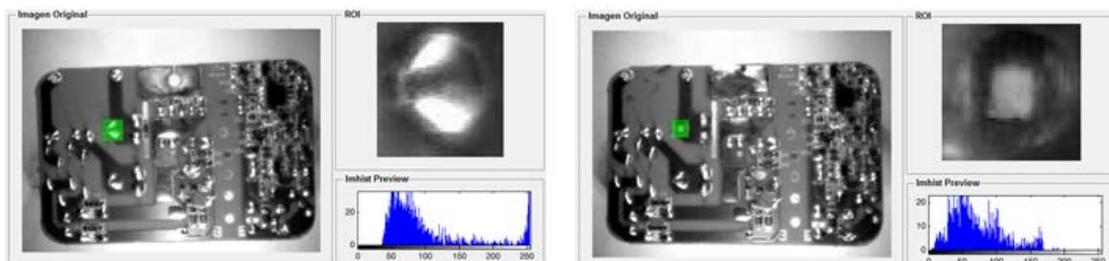
Figura 9 Ausencia de resistores.

En cuanto a la detección de defectos en soldaduras, los cambios de luminosidad pueden describir defectos como exceso de soldadura (figura 10), componente desoldado (figura 11), soldadura insuficiente y ausencia de componentes SMT entre otros.



a) Perforación necesaria para montaje en case.      b) Perforación cubierta con soldadura.

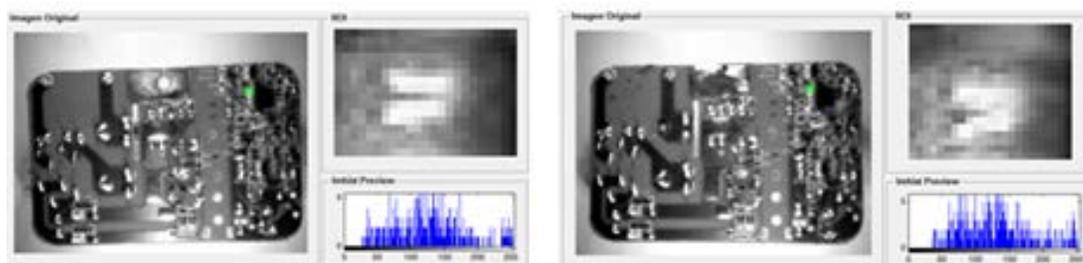
Figura 10 Detección de soldadura excesiva sobre una región.



a) Bien soldado y histograma de intensidad.      b) No soldado y variaciones en su histograma.

Figura 11 Componentes con histograma de intensidad.

En distinción a los defectos previos, la detección de corto circuito en componentes SMT no se realizaría de forma adecuada con la herramienta de luminosidad, ya que sus niveles de intensidad y distribución en la imagen son muy similares (figura 12). Sin embargo como se aprecia en la figura 12b aparece una unión entre pixeles claros cuando está presente un corto circuito en un circuito integrado SMT, por lo que la herramienta de Blob es más adecuada y nos proporciona una diferencia evidente entra la cantidad de pixeles claros cuando existe o no un corto-circuito.



a) Pines soldados adecuadamente. b) Unión pixeles claros por corto-circuito en pines.

Figura 12 Detección de corto circuito en circuito integrado SMT.

Por otra parte, para en la contabilización de CI SMT puede describirse umbralizando la imagen basados en la baja reflectancia de su cuerpo, produciendo una imagen binaria tal como se muestra en la figura 13 y tal que a través de sus momentos invariante podemos localizarlos y contabilizarlos.



a) Circuito iluminación coaxial. b) Segmentación por reflectancia. c) Ubicación y conteo de SMT.

Figura 13 Conteo de patrones para contabilización de CI.

## Implementación de prototipo e interfaz de usuario

El prototipo consiste en una cámara cerrada, donde internamente está conformada por una webcam común y un sistema de tira de leds que proporcionan una configuración de iluminación frontal y lateral (figura 14).



Figura 14 Sistema de adquisición de imagen y configuración de iluminación.

Para llevar el control del sistema de iluminación, así como la adquisición de imagen, configuración de herramientas de detección, análisis de imagen y visualización de resultados de inspección, se implementó un GUI en Matlab (figura 15).

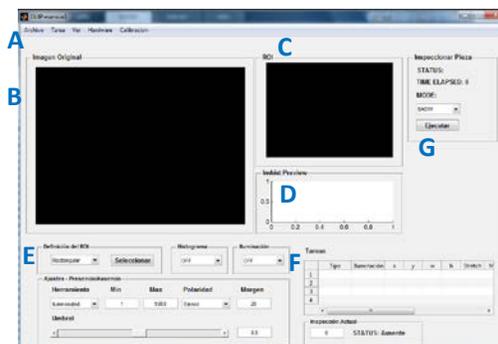


Figura 15 Interfaz de usuario para inspección de PCB.

La interfaz de usuario está conformada por las siguientes secciones: A, sección donde el usuario puede cargar una imagen, guardar y cargar tareas desde disco duro; B, sección de visualización de imágenes adquiridas; C, sección que permite ver con mayor acercamiento una región de interés establecida en A; D, visualización del histograma de la región mostrada en C; E, sección de

configuración de parámetros en las herramientas; F tabla de memorización de atributos configurados en las herramientas; G, botón de ejecución para verificación de todas las características programadas en F.

## 5. Discusión

Para la verificación de la funcionalidad del prototipo se inspeccionaron seis defectos en soldaduras, cada herramienta configurada a tolerancias mínima y máxima para su detección, tal y como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1 Asignación de inspecciones para prueba de prototipo.

Defecto	Herramienta	Min	Max	Polaridad	Umbral
<b>Exceso de Soldadura</b>	Luminosidad	150	170		
<b>Soldadura Insuficiente</b>	Luminosidad	85	95		
<b>Componente desoldado</b>	Luminosidad	100	110		
<b>Corto circuito</b>	Blob	160	180	Blanco	
<b>Perforación desplazada</b>	Circular	8	23	Blanco	0.77
	Recuento de Pixeles	250	300	Blanco	
<b>Ausencia de componente SMT</b>	Luminosidad	110	130		

La implementación del programa en Matlab fue realizada sobre una laptop con procesador Intel Core 2 Duo a una velocidad de 2.53 GHz bajo un sistema operativo de 32 bits y memoria RAM de 4GB. El tiempo de procesamiento obtenido fue de 1.277 segundos. En comparativa con el software In Sight Explorer tiene una desventaja de un 1000 a 1 en velocidad. Sin embargo, posee la ventaja de generar visualizaciones de resultados parciales, permitiendo una conceptualización más firme del procesamiento que implica la detección de una falla y un mejor ajuste, además de que el software generado no posee un límite en número de inspecciones.

## 6. Conclusiones

El desarrollo de algoritmos para la detección de defectos en procesos industriales a través del software Matlab permite una comprensión de la importancia de variación de parámetros en procesos como umbralización, segmentación,

operadores morfológicos, detección de líneas, etc., permitiendo una conceptualización más adecuada a través de resultados parciales y finales en procesos de inspección visual.

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

## **7. Bibliografía y Referencias**

- [1] Basic PCB Concepts. <http://www.pcb.electrosoft.cl/04-articulos-circuitos-impresos-desarrollo-sistemas/01-conceptos-circuitos-impresos/conceptos-circuitos-impresos-pcb.html>. Fecha de consulta: abril 2016.
- [2] G. Pajares Martinsanz, J. M. de la Cruz García, *Visión por Computador – Imágenes digitales y aplicaciones*. Segunda Edición. 2008. Editorial Alfaomega Ra-Ma. México. pp. 88 – 89.
- [3] R. C. Gonzalez, *Digital Image Processing Using Matlab*. Segunda Edición. 2009. Editorial Woods & Eddins. USA. pp. 381-383.
- [4] W. Burger, M.J. Burge, *Principles of Digital Image Processing*. 2009. Editorial Springer. UK. pp. 63-65.
- [5] F. Shih, *Image Processing and Pattern Recognition – Fundamentals and Techniques*. 2010. Editorial Wiley.
- [6] J. Flusser, "On the Independence of Rotation Moment Invariants". *Pattern Recognition*. Vol. 33. Número 33. 19 de Mayo de 1999. pp. 1405–1410.
- [7] L. Wang, Y. Zhang, J. Feng, "On the Euclidean Distance of Images". *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. Vol. 27. Número 8. 2005. pp. 1334-1339.

# IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPO DE UNA MÁQUINA DE GRABADO CON LÁSER CONTROLADA POR UN RASPBERRY PI

***Horacio Orozco Mendoza***

Instituto Tecnológico de Celaya

*horacio.orozco@itcelaya.edu.mx*

***José Guadalupe Zavala Villalpando***

Instituto Tecnológico de Celaya

*jk.zavala@itcelaya.edu.mx*

***Karla Alejandra Rodríguez Sotelo***

Instituto Tecnológico de Celaya

*11030563@itcelaya.edu.mx*

***Omar Calderón Nieto***

Instituto Tecnológico de Celaya

*11251263@itcelaya.edu.mx*

## **Resumen**

En este trabajo se presenta una máquina PEN PLOTTER (EDG2400) para su uso como CNC de grabado con láser con una potencia de 2 W, cuya precisión es superior a 0.01 mm y con dimensiones de área de trabajo de 40x25 cm. La rehabilitación de la máquina PEN PLOTTER se realizó dentro de un esquema de bajo costo sin contemplar mano de obra.

Para el control de la máquina se hizo uso de una tarjeta Raspberry Pi con la finalidad de hacer portable el sistema sin sacrificar su funcionalidad. Con esto se logró que la máquina CNC no dependa de una computadora adicional, ya que la mayoría de las máquinas actuales utilizan diferentes tipos de placas de programación y éstas se conectan por medio de periféricos a la computadora impidiendo así su portabilidad.

Una de las múltiples ventajas que se tiene al utilizar la tarjeta Raspberry Pi son sus puertos GPIO, siendo estos de dos tipos, de propósitos generales (conexiones configurables) o especiales (conexiones seriales); teniendo de esta manera diversidad en la elección de comunicación, teniendo con esto una interfaz entre el programa y la parte electrónica.

Se hace uso del sistema operativo Ubuntu Mate en la Raspberry Pi para el desarrollo de una aplicación en lenguaje Python, que permite realizar el control de los motores a pasos con una etapa potencia adecuada por medio de los puertos periféricos (GPIO) generando la trayectoria y velocidad que el sistema requiera. El programa desarrollado tiene como finalidad el ejecutar los comandos proporcionados por un archivo Gcode, el cual contiene la vectorización de los patrones a ejecutar.

**Palabra(s) Clave(s):** CNC, Gcode, láser, pen plotter, raspberry Pi.

## **1. Introducción**

Las máquinas CNC con láser en su mayoría provienen de otros países, usualmente requieren para su funcionamiento del uso de una computadora y en algunos casos es necesario adquirir un software para su funcionamiento haciendo su adquisición más costosa.

Por otra parte para el desarrollo del sistema se propone la rehabilitación de una máquina PEN PLOTTER para uso como CNC de grabado con láser controlada por medio de una tarjeta Raspberry Pi. Para el uso de la máquina se desarrolló un programa para la plataforma Raspberry Pi con la finalidad de eliminar el uso de PC y tarjetas alternativas para el control de estas máquinas. Dicho programa está dirigido a la creación de una conexión innovadora de acuerdo a la tendencia de los lenguajes de programación.

## **2. Desarrollo**

El proyecto se encuentra dividido en tres secciones: procesamiento que engloba los softwares utilizados; la sección de control, donde se presentan las características de los motores y Driver utilizados; finalizando con la sección de

estructura, en donde se exponen los diseños creados para la implementación de la máquina PEN PLOTTER como grabado con láser.

## Procesamiento

En la programación para la implementación de este proyecto se usaron diferentes softwares, cada uno con una tarea específica como la generación del Gcode, la realización de una interfaz gráfica y la lectura del Gcode, todo ello bajo el sistema operativo Ubuntu Mate.

## Sistema operativo

Ubuntu Mate es un sistema operativo basado en Linux, esta versión está hecha para un procesador ARMv7, el cual tiene integrado la Raspberry Pi en sus modelos 2 y 3. Este sistema operativo se puede instalar en una memoria MicroSD de 8 Gb o mayor para ser utilizado en dicho ordenador. Se recomienda que sea en una memoria de mayor capacidad ya que tendrá un mejor rendimiento.

Las características de la tarjeta Raspberry Pi 2 utilizada en este proyecto se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Características Raspberry Pi 2.

Características	Descripción
Procesador	900MHz quad-core ARM Cortex-A7 CPU
RAM	1 GB
USB	4 Puertos
GPIO	40 Pines
HDMI	1 puerto
Ethernet	1 puerto
Audio	Jack de audio 3.5mm vídeo compuesto
Cámara	Interfaz de cámara (CSI)
MicroSD	1 lector
Video	VideoCore IV 3D

## Software

Los softwares utilizados son de acceso libre y corresponden a los siguientes:

## Python

Se hizo uso de Python que es un lenguaje de programación adoc para ser implementado en la tarjeta Raspberry Pi. Cuenta con estructuras de datos eficientes y de alto nivel y un enfoque simple pero efectivo a la programación orientada a objetos. Algunas de las características de este lenguaje se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 Características lenguaje Python.

Características	Descripción
Propósito general	Se pueden crear todo tipo de programas. No es un lenguaje creado específicamente para la web.
Multiplataforma	Hay versiones disponibles en muchos sistemas informáticos distintos.
Interactivo	Dispone de un intérprete por línea de comandos en el que se pueden introducir sentencias.
Orientado a Objetos	Ofrece en muchos casos una manera sencilla de crear programas con componentes reutilizables.
Funciones y librerías	Dispone de muchas funciones incorporadas en el propio lenguaje, para el tratamiento de strings, números, archivos, etc.
Sintaxis clara	Posee una sintaxis muy visual, gracias a una notación indentada (con márgenes) de obligado cumplimiento.

## Qt Creator

Para el desarrollo de la interfaz gráfica se hizo uso del programa Qt Creator (figura 1); el cual es una interfaz gráfica de usuario cuyo objetivo es proporcionar una plataforma cruzada, con un completo entorno de desarrollo integrado (IDE) para desarrollar proyectos de Qt. Está disponible para Linux, Mac OS X y las plataformas de Windows.



Figura 1. Logo Qt Creator.

## **Inkscape**

Para la vectorización y creación del Gcode se hizo uso del programa Inkscape (figura 2), que es un editor gráfico de vectores, gratuito y de código libre, puede crear y editar gráficos vectoriales como ilustraciones, diagramas, líneas, gráficos, logotipos, e ilustraciones complejas. Dicho programa contiene sofisticadas herramientas de dibujo con una capacidad comparable a Adobe Illustrator, CorelDRAW y Xara Xtreme.



Figura 2 Logo Inkscape.

Inkscape se encuentra desarrollado principalmente para el sistema operativo GNU/Linux, pero es una herramienta multiplataforma y funciona en Windows, Mac OS X, y otros sistemas derivados de Unix.

### **Diagrama a bloques del programa**

En las figuras 3, 4 y 5 se muestra el diagrama a bloques de la lógica que se siguió para la realización del programa en lenguaje Python.

En la figura 3 se muestra la primera sección donde se ejecuta el programa, se calibra el láser dependiendo del material con el que se vaya a trabajar (MDF, vinil, acrílico, etc), se carga el archivo Gcode con extensión (.txt) si el archivo no existe se envía una advertencia. Se debe ingresar la velocidad de trabajo (el programa está limitado a 50mm/s) y la potencia del láser recordando que es de 2W (el programa está limitado a 90%); se puede empezar a leer el archivo Gcode desde cero o desde una línea que se introduzca, si se desea desde una línea específica esta deberá ser menor al número total de líneas del archivo. Una vez ingresada o no ingresada la línea de comienzo, el láser se posiciona en el origen y se comienza a leer línea a línea el archivo.

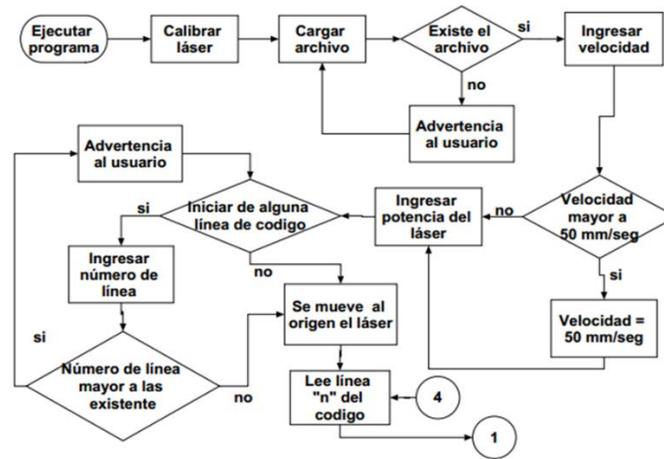


Figura 3 Diagrama a bloques.

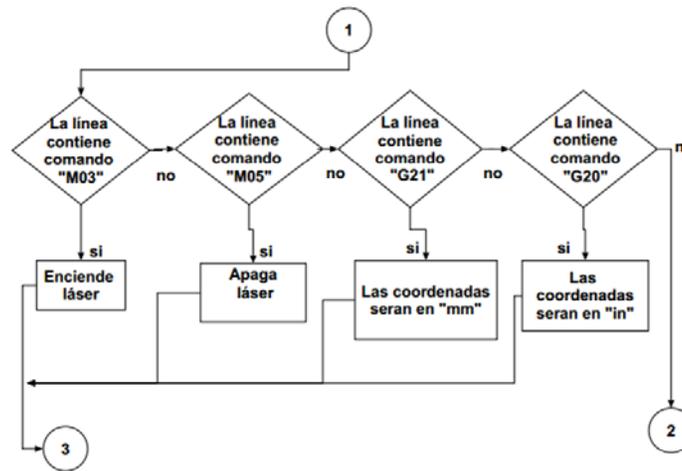


Figura 4 Diagrama a bloques.

Dentro del archivo Gcode se buscan los comando que nos interesan y se realizan las acciones correspondientes para cada uno, M03 (encender láser), M05 (apagar láser), G21 (coordenadas en mm), G20 (coordenadas en in) (figura 4).

Si los comandos leídos son G02 o G03 se extraen las coordenadas de X, Y, I y J respectivamente ya que este movimiento será circular; de lo contrario si se leen comandos G00 o G01 se extraen solamente X y Y debido a que el movimiento es lineal.

Si se encontró algún comando o se realizó el movimiento correspondiente se suma un 1 a la línea y se compara el número de líneas total con el leído, si son iguales el programa se termina si no es así se vuelve a iterar (figura 5).

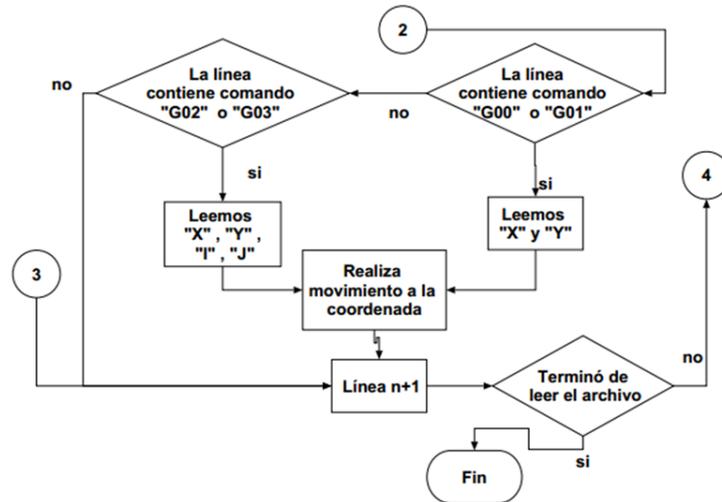


Figura 5 Programa a bloques.

## GPIO'S

La Raspberry Pi 2 cuenta con 40 pines como se muestra en la figura 6 de los cuales 2 son de voltaje a 3.3 V, 2 pines más a 5 V, 8 pines conectados a GND, 17 pines de uso general, 5 con comunicación de protocolo SPI, 2 para protocolo i2c, y 2 más de protocolo UART con 2 pines que no se utilizan. Para este proyecto se hizo uso de las terminales del GPIO que se muestran en tablas 3 y 4.

Tabla 3 GPIO's.

3.3V	1	2	5V
GPIO2	3	4	5V
GPIO3	5	6	GND
GPIO4	7	8	GPIO14
GND	9	10	GPIO15
GPIO17	11	12	GPIO18
GPIO27	13	14	GND
GPIO22	15	16	GPIO23
3.3V	17	18	GPIO24
GPIO10	19	20	GND
GPIO9	21	22	GPIO25
GPIO11	23	24	GPIO8
GND	25	26	GPIO7
DNC	27	28	DNC
GPIO5	29	30	GND
GPIO6	31	32	GPIO12
GPIO13	33	34	GND
GPIO19	35	36	GPIO16
GPIO26	37	38	GPIO20
GND	39	40	GPIO21

Tabla 4 GPIO'S utilizados.

GPIO	# Pin	Actividad
17	11	Control láser
5	29	Sensor Y
6	31	Sensor X
18	12	Habilitar dirección Y
23	16	Pasos Y
24	18	Dirección Y
12	32	Botón Paro
16	36	Habilitar dirección X
20	38	Pasos X
21	40	Dirección X
26	37	Switcheo Voltaje

## Control

Para realizar el movimiento del trazado de las imágenes vectorizadas leídas por medio del programa en Python, se utilizaron motores cuyas características principales son: precisión y control de posición sin necesidad de sensores adicionales.

### Motores a paso bipolares

Los motores paso a paso bipolares tienen generalmente 4 cables de salida (figura 6). Necesitan ciertos trucos (voltajes bajos, corrientes altas y frecuencia de conmutación elevada) para ser controlados debido a que requieren del cambio de

dirección de flujo de corriente a través de las bobinas en la secuencia apropiada para realizar un movimiento.

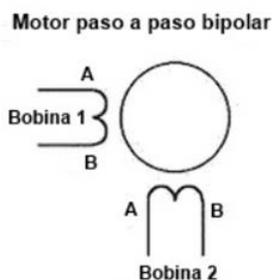


Figura 6 Motores paso a paso bipolares.

En la tabla 5 se muestra la secuencia necesaria para controlar motores paso a paso bipolares.

Tabla 5 Secuencia de control.

Paso	Terminales			
	A1	B1	A2	B2
1	+V	-V	+V	-V
2	+V	-V	-V	+V
3	-V	+V	-V	+V
4	-V	+V	+V	-V

En la selección de un motor paso a paso se tienen que tomar en cuenta ciertos factores dependiendo de la aplicación:

- Voltaje y corriente máximos
- Resolución
- Torque
- Costo

Las características de los motores que se utilizaron en este proyecto se muestran en tabla 6.

Tabla 6 Características motores.

Motor 1	Características	Motor 2
KP42EM1-016	Modelo	KP42HM1-022
Si	Bipolar (4 hilos)	Si

0.9	<b>Grados</b>	0.9
3-5 V	<b>Alimentación</b>	3-5V
0.5-1 A	<b>Corriente</b>	1-2 A

## Driver

Un driver es un conjunto de dispositivos electrónicos que recibe las órdenes de movimiento del ordenador y maneja en consecuencia los motores como se muestra en la figura 7.

Existe una amplia variedad de drivers que se pueden adquirir de acuerdo a sus características técnicas para adaptarse mejor a diferentes equipos.

Para el proyecto se desarrolló un driver con diversos componentes electrónicos con la intención de reducir el costo de la máquina.

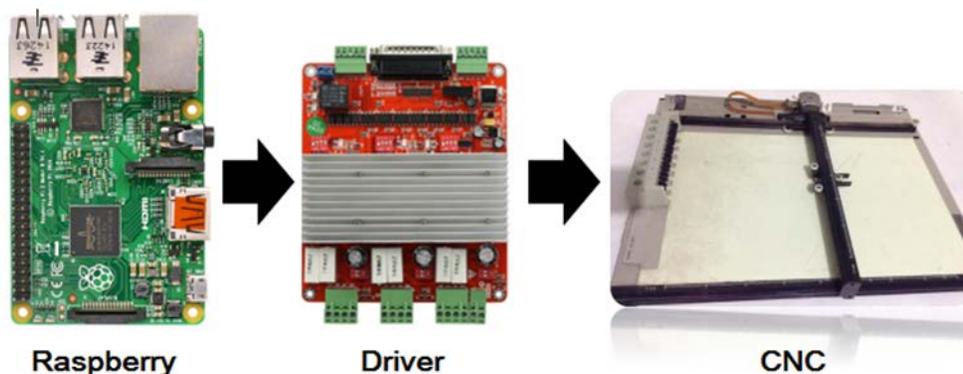


Figura 7 Esquema de comunicación.

El controlador utilizado está basado en el chip A4988 de Allegro (figura 9), cuyas características son:

- Control simple de dirección y paso.
- Cinco diferentes resoluciones de paso.
- Corriente de salida ajustable mediante un potenciómetro.
- Puede proporcionar hasta 2A por bobinado y opera desde 8 a 35V.
- Protección de temperatura, sobre-voltaje y sobre-corriente.
- Tienes salidas auto-reguladas de 5V y 3.3V para alimentar la lógica externa.

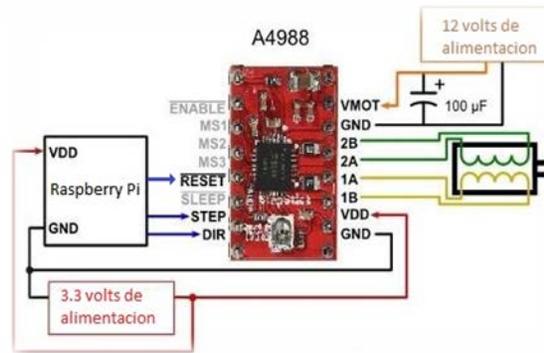


Figura 8 Driver A4988.

## Estructura

Como ya se mencionó se utilizó la estructura una máquina PEN PLOTTER. Un PEN PLOTTER realiza trazos por medio del movimiento de un bolígrafo u otro instrumento a través de la superficie de una hoja de papel. Esto significa que son dispositivos trazadores gráficos vectoriales. Pueden dibujar líneas de arte complejo, incluyendo el texto, pero lo hacen lentamente debido al movimiento mecánico de las plumas.

Para la finalidad de este proyecto se realizaron 3 prototipos de bases, debido a que se reemplazó el uso de un bolígrafo por un láser. . En las figuras 9, 10 y 11 se muestran dichos prototipos, los cuales se diseñaron en el programa CAD (Dibujo Asistido por Computadora) para la base del láser que se adaptó a la estructura del PEN PLOTTER.

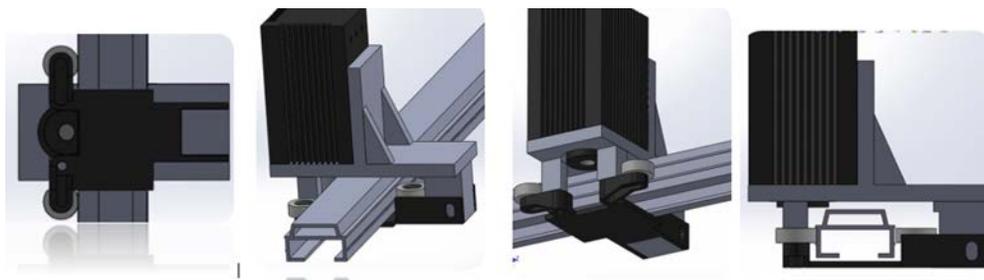


Figura 9 Prototipo 1.

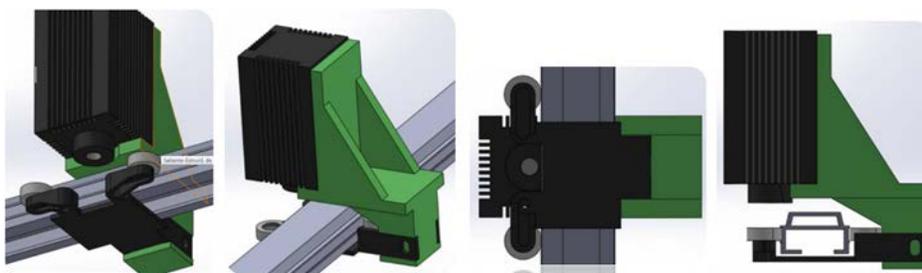


Figura 10 Prototipo 2.

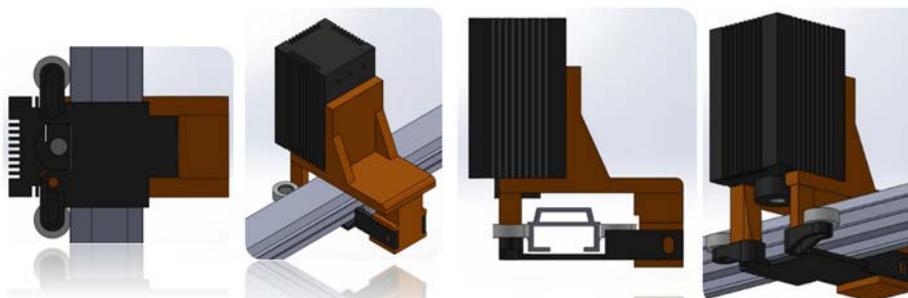


Figura 11 Prototipo 3.

El prototipo elegido para la realización de este proyecto fue el diseño 3, dicha selección se realizó en base a los criterios mostrados en la tabla 7.

Tabla 7 Tabla comparativa de prototipos.

Características	Prototipo 1	Prototipo 2	Prototipo 3
Acceso a la lente	Baja	Buena	Buena
Distribución de peso	Bueno	Bajo	Bueno

### 3. Resultados

Los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo se mencionan a continuación. Se realizaron dos PCBs para el correcto funcionamiento del trabajo, una para la etapa del control de los motores (figura 12) y otra PCB (figura 13) para la alimentación de los motores y del láser.



Figura 12 PCB motores.



Figura 13 PCB alimentación.

Se realizó un programa de código abierto en el lenguaje de programación Python (figura 14).

Se realizó una interfaz gráfica (figura 15) para el manejo y control de la máquina CNC, dicha interfaz se diseñó en el programa Qt Creator utilizando su aplicación Qt Designer.

```
from PyQt4.QtCore import QTimer
import RPi.GPIO as GPIO
import math
GPIO.setmode(GPIO.BCM)
btnstop=12
btnx=6
btny=5
GPIO.setup(btnx,GPIO.IN)
GPIO.setup(btny,GPIO.IN)
GPIO.setup(btnstop,GPIO.IN)
pines=[21,20,16,24,23,18,17,26]
GPIO.setup(pines,GPIO.OUT)
GPIO.output(pines,False)
pwm = GPIO.PWM(17,500)
pwm.start(0)
pwm.ChangeDutyCycle(0)
GPIO.output(26,1)

#
form_class = uic.loadUiType("visualcncclaser.ui")[0]
#
class ThC(threading.Thread):
    def __init__(self,MyQueue,nombre,velocidad,opcional,potencia):
        threading.Thread.__init__(self)
        self.coorxQueue=MyQueue
        self.cooryQueue=MyQueue
        self.prxQueue=MyQueue
        self.pryQueue=MyQueue
        self.lineaQueue=MyQueue
        self.porcQueue=MyQueue
        self.laserQueue=MyQueue
        self.finQueue=MyQueue
        self.nombre=nombre
        self.velocidad=float(velocidad)
        self.opcional=opcional
        self.potencia=float(potencia)
        self.capturing = 0
        self.laser=0
```

Figura 14 Código Python.



Figura 15 Interfaz gráfica.

Algunos patrones obtenidos al poner en funcionamiento la máquina CNC láser se muestran en las figuras 16 y 17, en donde se puede observar la gran diversidad de grabados realizados.



Figura 16 Patrón realizado.



Figura 17 Patrón realizado.

#### 4. Conclusiones

Las conclusiones obtenidas en el desarrollo de este trabajo se enuncian a continuación, de tal forma que el proyecto se realizó de manera exitosa.

Se logró crear un código de código abierto en el lenguaje de programación Python. La máquina CNC de grabado en láser realiza patrones simples y complejos de forma óptima cuya precisión es superior a 0.01 mm.

El presupuesto inicial que se tenía planeado para la rehabilitación del PEN PLOTTER no fue respetado debido a que inicialmente se había contemplado un láser de menor potencia.

Se logró obtener total portabilidad del sistema por medio del control e implementación de la tarjeta Raspberry Pi.

Se diseñó e implementó una interfaz gráfica para el manejo y control de la máquina CNC de tal forma que fuese de fácil acceso para el usuario.

## **5. Referencias**

- [1] Raspberry Pi Model B. Fecha de consulta: 20 de mayo de 2016. URL: <https://www.raspberrypi.org/>.
- [2] About Python. Fecha de consulta: 20 de mayo de 2016. URL: <https://www.python.org/>.
- [3] Why Qt? Fecha de consulta: 20 de mayo de 2016. URL: <https://www.qt.io/ide/>.

# **CONTROLADOR DIGITAL DE UN RECTIFICADOR PWM MONOFÁSICO, IMPLEMENTADO EN UN DISPOSITIVO PROGRAMABLE DE BAJO COSTO**

***Julio Ortega Alejos***

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato  
*j.ortega@itsur.edu.mx*

***Leonel Estrada Rojo***

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato  
*l.estrada@itsur.edu.mx*

***Elías J. J. Rodríguez Segura***

Instituto Tecnológico de Celaya

***Carlos A. Fuentes Hernández***

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato  
*ca.fuentes@itsur.edu.mx*

***Juan Pablo Lemus Calderón***

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato

## **Resumen**

El rectificador PWM es un convertidor electrónico con altas prestaciones, tales como: factor de potencia alto, bi-direccionalidad, alta eficiencia y elevación de voltaje en modo rectificador; Estas prestaciones son obtenidas gracias a técnicas de control que involucran diferentes operaciones matemáticas, las cuales se implementan rápidamente si se utilizan dispositivos programables que cuentan con ambientes de programación muy amigables; sin embargo, cuando se piensa en un producto que tiene que salir al mercado, el costo de estos dispositivos programables y su ambiente de programación hacen inviable la propuesta. En este documento se presenta la implementación de un control clásico implementado en

un dispositivo programable de bajo costo, el cual mantiene las altas prestaciones que caracterizan al convertidor.

**Palabra(s) Clave(s):** dispositivo programable, factor de potencia, lazo de control, rectificador PWM, sintonización.

## **1. Introducción**

En la actualidad, cuando se requiere validar una técnica de control para un convertidor electrónico, se puede disponer de diferentes plataformas que pueden servir como interfaz entre una computadora y el convertidor electrónico, en la computadora se desarrolla el código utilizando ambientes de programación gráficos tales como MATLAB- SIMULINK o LabVIEW y éste se descarga a la plataforma en donde se implementa el controlador; Durante la ejecución del controlador se pueden monitorear en tiempo real y de forma gráfica, las señales involucradas en el sistema de control. Esta característica es de particular importancia cuando se sintonizan los controladores y cuando se somete a perturbaciones el sistema.

En el mercado se encuentran plataformas con tecnología de Entradas y Salidas reconfigurables, RIO (siglas del inglés Reconfigurable Input Output) estándar en la industria de National Instruments conocidas como CompactRIO y myRIO. CompactRIO de National Instruments, tiene software altamente integrado, una variedad de opciones de rendimiento y formato, extensas entradas y salidas para reducir el riesgo, impulsar el rendimiento del sistema y simplificar el diseño de sistemas avanzados de monitoreo y control embebidos. Los controladores CompactRIO ofrecen ejecutar algoritmos de control avanzado con tiempos de respuesta determinísticos y baja latencia.

NI myRIO utiliza el procesador ARM® Cortex™-A9 dual-core de rendimiento en tiempo real y Entradas y Salidas personalizadas. Al usar esta herramienta integrada de hardware y software, se pueden crear aplicaciones rápidamente en el procesador en tiempo real de NI myRIO, aprovechando la configuración de FPGA (siglas del inglés Field Programmable Gate Array).

También se puede disponer de la plataforma de la marca dSPACE, Real-Time Interface (RTI) es el software que integra completamente el Hardware dSPACE con Simulink y Real-Time Workshop. Todas las especificaciones para las entradas y salidas para su implementación en tiempo real se pueden definir en el ambiente de Simulink. RTI modifica el código generado por Real Time Workshop de acuerdo a las especificaciones establecidas para las entradas y salidas y lo procesa para cargarlo automáticamente al sistema basado en DSP (siglas del inglés Digital Signal Processor).

De las plataformas mencionadas la más económica es la myRIO de National Instruments, su costo en el mercado es de \$500 dólares, mientras que las otras plataformas pueden tener un precio mínimo de \$1500 dólares. Para propósitos académicos y de investigación, son plataformas de gran ayuda que permiten la validación del modelo de un controlador de forma rápida, justificando de esta manera la inversión; Sin embargo, cuando en una aplicación que va a salir al mercado se quiere utilizar un convertidor tal como el rectificador PWM, porque se desea contar con sus características de alto factor de potencia, bidireccionalidad y elevación de voltaje, la implementación del controlador en las plataformas mencionadas resulta en una propuesta inviable económicamente.

En el mercado se dispone también de microcontroladores de propósito específico para el control de convertidores de potencia, estos dispositivos programables pueden tener un costo de hasta \$10 dólares. Para optimizar al máximo el uso de memoria utilizada por el código del controlador, se recomienda programar en Ensamblador para la implementación de las operaciones matemáticas, o bien, se puede hacer una combinación de programación en C y programación en ensamblador. El software que se utiliza para desarrollar el código es gratuito y soporta todas las familias de microcontroladores del fabricante.

Una desventaja de implementar los controladores en esta plataforma es que no se puede monitorear en tiempo real las señales digitales dentro del microcontrolador, lo que provoca que la sintonización del controlador tenga que ser de forma empírica, utilizando como referencia la respuesta de las variables del convertidor electrónico.

En este documento se presenta la implementación de un controlador digital clásico en un dispositivo programable de la familia dsPIC de Microchip.

## 2. Desarrollo

La figura 1 muestra el circuito del rectificador PWM monofásico totalmente controlado conectado en puente, el cual utiliza cuatro interruptores de potencia con diodos conectados en anti-paralelo para obtener un voltaje de cd controlado,  $V_o$ . Para la operación apropiada de este rectificador, la magnitud del voltaje de salida debe ser mayor que la del voltaje de entrada en cualquier momento posterior al transitorio de arranque [1, 2, 3].

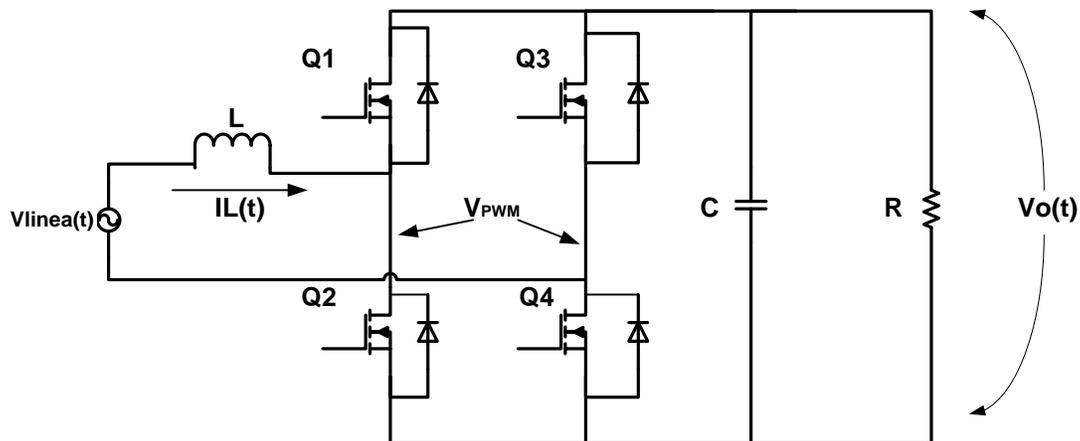


Figura 1 Rectificador PWM monofásico en conexión puente.

El principio de funcionamiento del rectificador PWM se basa en la operación de un convertidor BOOST, el cual pertenece a la familia de convertidores de transferencia de energía indirecta.

El procesamiento de la potencia involucra una fase de almacenamiento y una de liberación de energía. Durante el tiempo de encendido de un par de transistores (Q1 y Q3 ó Q2 y Q4) el inductor almacena energía y el capacitor por si solo suministra energía a la carga.

Cuando conducen los transistores Q1 y Q4 ó Q3 y Q2, la energía almacenada en el inductor aparece en serie con la fuente de alimentación y contribuye a suministrar energía al capacitor y a la carga, figura 2.

Esta configuración del rectificador PWM proporciona una corriente de entrada no pulsante en el modo de operación de conducción continua y hace de ésta una topología de bajo rizo en la corriente de entrada gracias a que un inductor se opone a variaciones rápidas de la corriente.

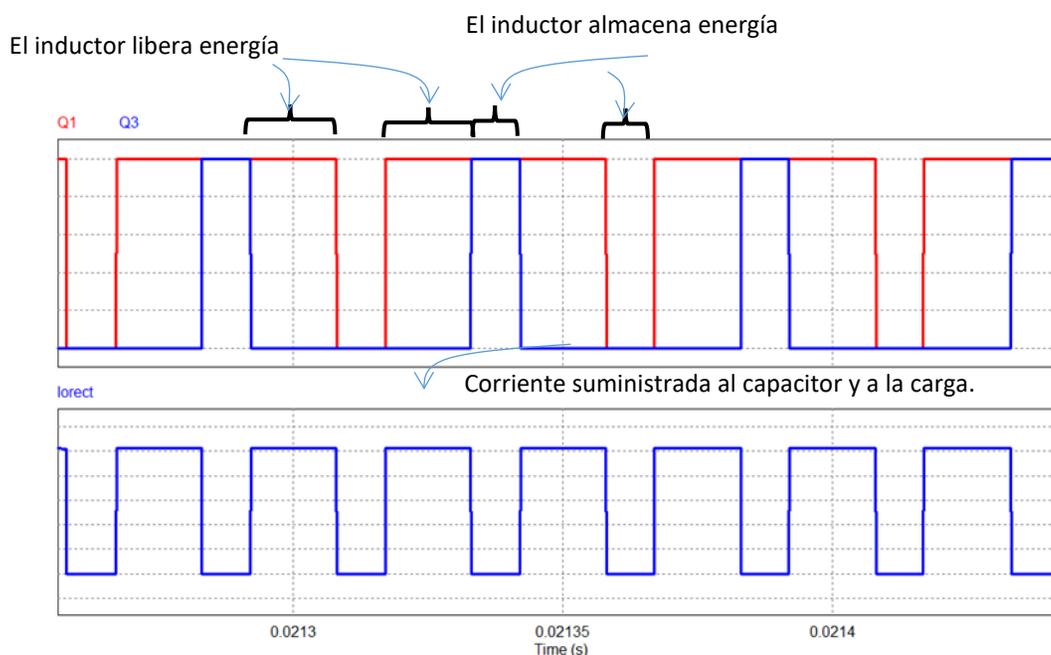


Figura 2 Ondas de señales de activación y de corriente de alimentación del capacitor.

Los posibles estados de conmutación de los interruptores con los que puede operar el rectificador PWM se identifican de acuerdo al nivel de voltaje establecido entre los puntos a' y b', conocido como  $V_{PWM}$  y son los siguientes:

- Q1 y Q4 están encendidos, Q2 y Q3 están apagados; por lo que  $V_{PWM} = V_o$  y se proporciona energía al capacitor y a la carga.
- Q1 y Q4 están apagados, Q2 y Q3 están encendidos; por lo que  $V_{PWM} = -V_o$  y se proporciona energía al capacitor y a la carga.

- Q1 y Q3 están encendidos, Q2 y Q4 están apagados; por lo que  $V_{PWM} = 0$ . O bien, Q1 y Q3 están apagados, Q2 y Q4 están encendidos; por lo que  $V_{PWM} = 0$  y se almacena energía en el inductor.

Para obtener dichos estados de conmutación se utiliza una modulación senoidal, en donde se hace variar el ancho de cada pulso en proporción con la amplitud de una onda senoidal evaluada en el centro del mismo pulso. Las señales de control se generan comparando una señal senoidal de referencia de frecuencia  $f_r$  con una onda portadora triangular de frecuencia  $f_c$ , figura 3.

La amplitud pico de la señal de referencia controla el índice de modulación de amplitud  $m_a$  y en consecuencia el voltaje de salida del convertidor. Al comparar la señal portadora bidireccional  $v_c$ , con dos señales de referencia,  $v_r$  y  $-v_r$ , se producen las señales de disparo de los transistores Q1 y Q4 respectivamente.

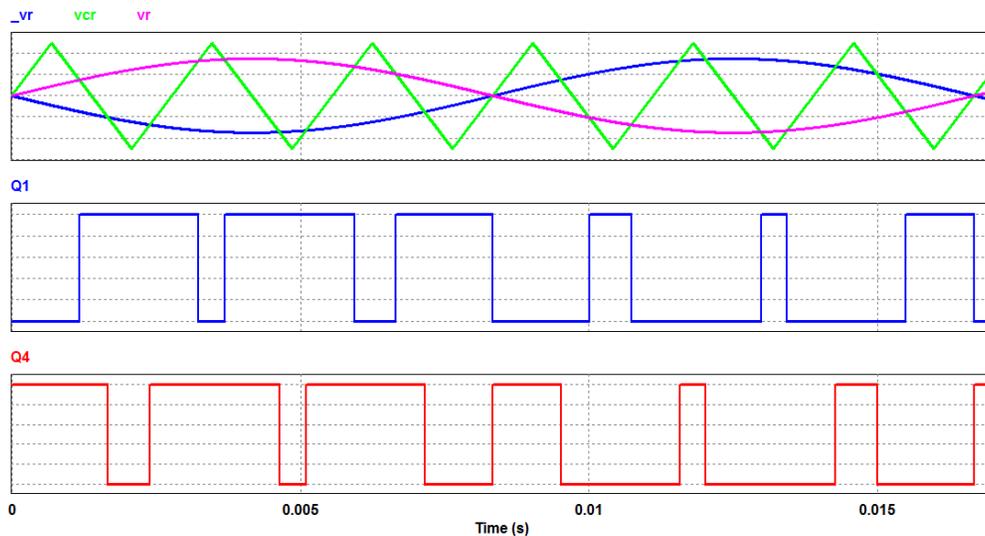


Figura 3 Señales de control de interruptores a partir de modulación senoidal.

Las señal de disparo del transistor Q2 es el complemento de Q1 y la de Q3 el complemento de Q4. La cantidad de pulsos por ciclo la establece el índice de modulación de frecuencia ( $M_f$ ) que se encuentra en función de las frecuencias de la señal portadora de las señales de referencia, ecuación 1.

$$M_f = \frac{f_c}{f_r} \quad (1)$$

Cuando es  $M_f$  es mayor a 21 se dice que se tiene un rectificador muy modulado y cuando es menor se dice que está poco modulado [5].

## Control del rectificador PWM

El esquema de control clásico se muestra en la figura 4. El control incluye un controlador de voltaje, [6]. Típicamente es un controlador proporcional- integral (PI), el cual controla la cantidad de potencia requerida para mantener el voltaje de salida de CD ( $V_o$ ) constante. El controlador de voltaje proporciona el punto de ajuste de la amplitud de la corriente de entrada. Por esta razón, la salida del controlador de voltaje se multiplica por una señal senoidal con la misma fase y frecuencia del voltaje de la red,  $v_s(t)$ , a fin de obtener la referencia de la corriente de entrada,  $i_{sref}$ .

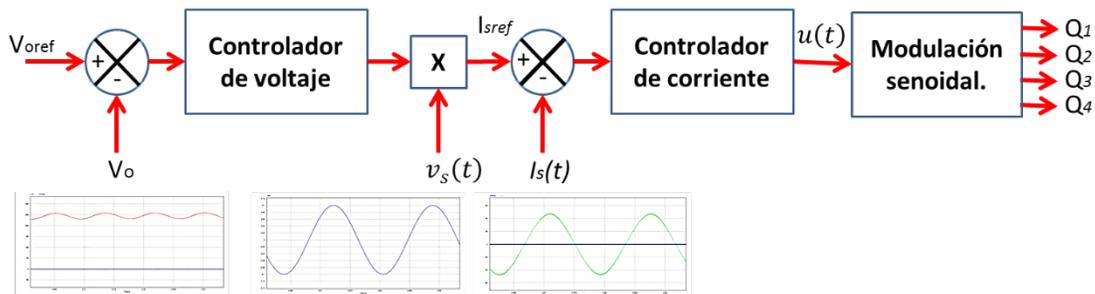


Figura 4 Esquema de control clásico para el rectificador PWM.

El controlador de corriente proporciona la señal de control que determinará el índice de modulación de amplitud. La rápida respuesta del controlador de corriente, provoca que se obtenga un alto factor de potencia en la entrada del convertidor.

El voltaje de salida del rectificador,  $V_o$ , presentará un rizo con una frecuencia igual al doble de la frecuencia de línea. Si este rizo pasa a través del controlador de voltaje, producirá una componente del tercer armónico en la corriente de entrada. La amplitud de este armónico se puede atenuar con un filtro pasa bajas en la retroalimentación del voltaje de salida,  $V_o$ .

## Diseño del sistema

El sistema está conformado principalmente por la etapa de potencia que se encargará de realizar la conversión de energía alterna a continua a través del rectificador PWM, el cual es comandado por las señales provenientes de la etapa de control en donde se implementan en un micro-controlador los algoritmos para la regulación de voltaje y corriente; tal como se muestra en figura 5.

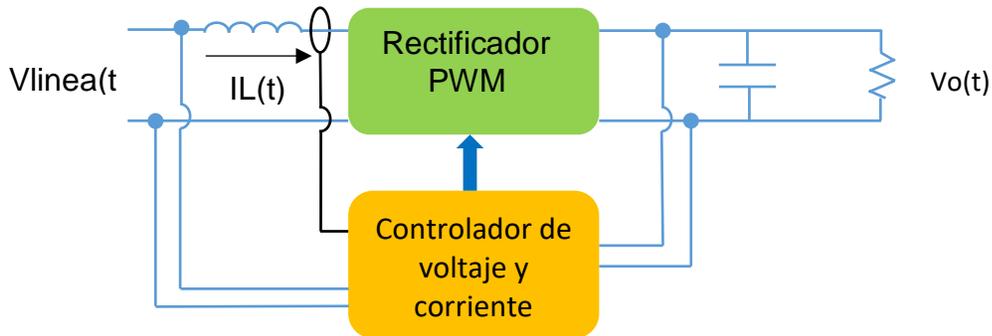


Figura 5 Diagrama a bloques del Rectificador PWM en lazo cerrado.

Los niveles de voltaje de la red y de salida del rectificador se obtienen por medio de sensores ISO124 con aislamiento capacitivo. El sensor correspondiente al voltaje de salida del rectificador proporciona un voltaje directo de 2.5 volts cuando en el bus de salida se tienen 125 volts. Ésta señal se transmite directamente a un canal de conversión del CAD.

El sensor del voltaje de red, entrega una señal de  $\pm 2.5$  volts pico cuando el voltaje pico de la red es de  $\pm 105$  volts. Dado que la polaridad del voltaje de la red cambia por su forma de onda senoidal, es necesario efectuar un acondicionamiento de la señal a fin de que al microcontrolador solamente le lleguen valores positivos de la señal; por tal motivo fue necesario rectificar la señal senoidal con un rectificador de precisión implementado con amplificadores operacionales para que no se tuvieran recortes en la señal de voltaje debido a la pérdida de 0.7 volts que presentan los diodos en los rectificadores convencionales;

Se implementó también un detector de semiciclo que envía una señal en alto a una terminal del microcontrolador cuando se presente un semi-ciclo positivo en el

voltaje de la red para que se logre sincronizar. El detector de semi-ciclo debe ser implementado con un amplificador operacional con una configuración con retroalimentación positiva para que se pueda agregar una ventana de histéresis de 0.1 volt para evitar falsas transiciones por efectos del ruido.

La corriente del inductor se retroalimenta con un transductor de corriente LEM25 que proporciona  $\pm 0.625$  volt por cada 25 Amperes con un offset de 2.5 volts. El acondicionamiento de la señal es muy parecido al de la señal de voltaje de la red. Con excepción de que se le agrega un restador de 2.5 volts para tener la referencia de 0 amperes en 0 volts y posteriormente pasar al rectificador de precisión y al detector de semiciclo, figura 6.

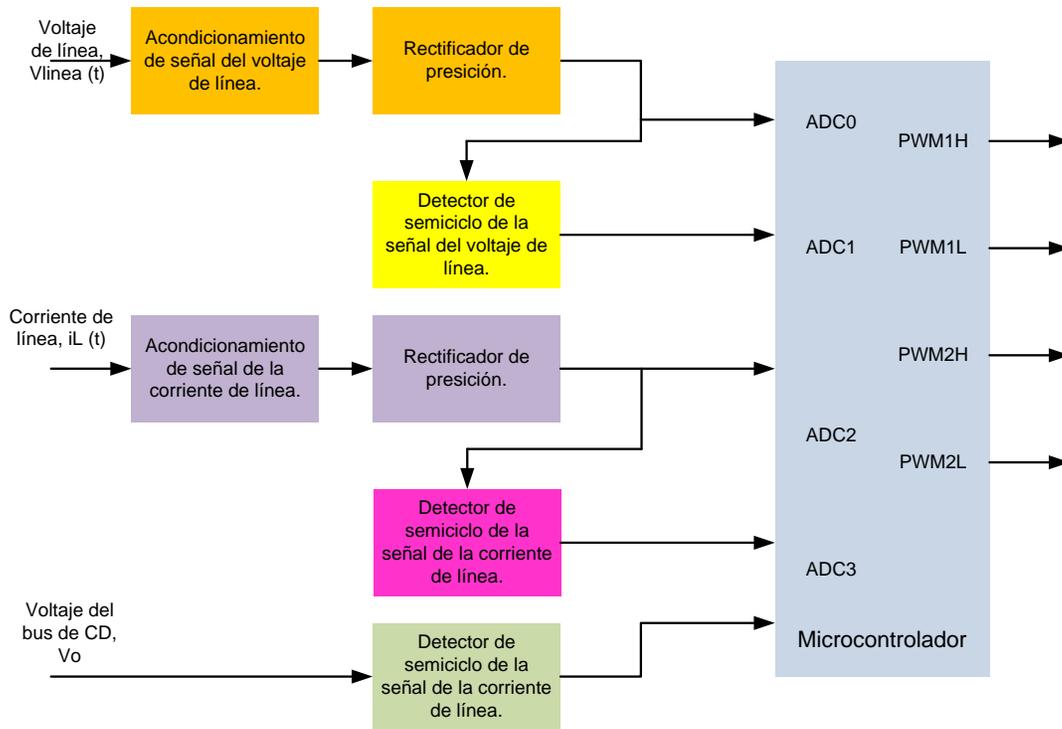


Figura 6 Diagrama a bloques del acondicionamiento de señales.

## Implementación del control digital

Para la implementación del controlador se deben de analizar los requerimientos computacionales para la manipulación de las señales involucradas en el mismo. Como se puede observar en la figura 4, es necesario efectuar comparaciones, multiplicaciones, la implementación de dos controladores PI y generar una señal

triangular para la modulación PWM. Si la implementación del controlador fuera de manera completamente analógica, involucraría una gran cantidad de componentes que implicaría una mayor susceptibilidad de las señales a ser contaminadas por el ruido generado por las conmutaciones del convertidor de potencia, requeriría mayor espacio e involucraría un cambio continuo de los componentes durante las pruebas experimentales a fin de modificar ganancias, acondicionamientos de señal y sintonización de controladores PI.

Por tal motivo se optó por la implementación del controlador de manera digital, se seleccionó un microcontrolador de la familia dsPIC de Microchip de propósito específico para el control de convertidores de potencia, el dsPIC30F4011. Éste microcontrolador se caracteriza fundamentalmente por tener módulos para la generación de señales PWM, múltiples canales de conversión analógico a digital (CAD) de 10 bits y capacidad de efectuar multiplicaciones en un ciclo de reloj a una velocidad de ejecución de las instrucciones de 30 Mega Instrucciones Por Segundo (MIPS). Ésta capacidad de procesamiento permite manipular las señales en un tiempo muy corto durante cada ciclo de conmutación del convertidor.

En la figura 7 se muestra el diagrama de flujo para la inicialización de los módulos ADC, PWM y puertos de propósito general, mientras en la figura 8 se presenta el diagrama de flujo de la rutina de interrupción del ADC, la cual debe de ejecutarse en un tiempo no mayor a un ciclo de conmutación.

Como se mencionó anteriormente, las señales de control del rectificador se obtendrán a partir de una modulación senoidal, en donde son necesarias dos señales senoidales de referencia, una de dichas señales es la que se obtiene directamente del controlador de corriente ( $v_r$ ) y se obtiene su inversa para generar la otra señal de referencia ( $-v_r$ ). La señal portadora bidireccional  $V_c$ , se obtiene del módulo PWM del dsPIC y consiste en un contador ascendente – descendente llamado PTMR en donde el valor máximo de conteo asignado determina la frecuencia de conmutación de la señal PWM, figura 9. El valor de PTMR está en función de la velocidad de ejecución de las instrucciones y la frecuencia deseada del PWM como se expresa en la ecuación (2), [7].

$$PTPER = \frac{F_{cy}}{F_{PWM} * (PTMR Prescaler) * 2} - 1 \quad (2)$$

En donde:

$PTPER$  : Valor máximo contador para establecer la frecuencia de conmutación deseada del PWM.

$F_{cy}$  : Frecuencia de ejecución de las instrucciones.

$F_{PWM}$  : Frecuencia deseada de la señal PWM.

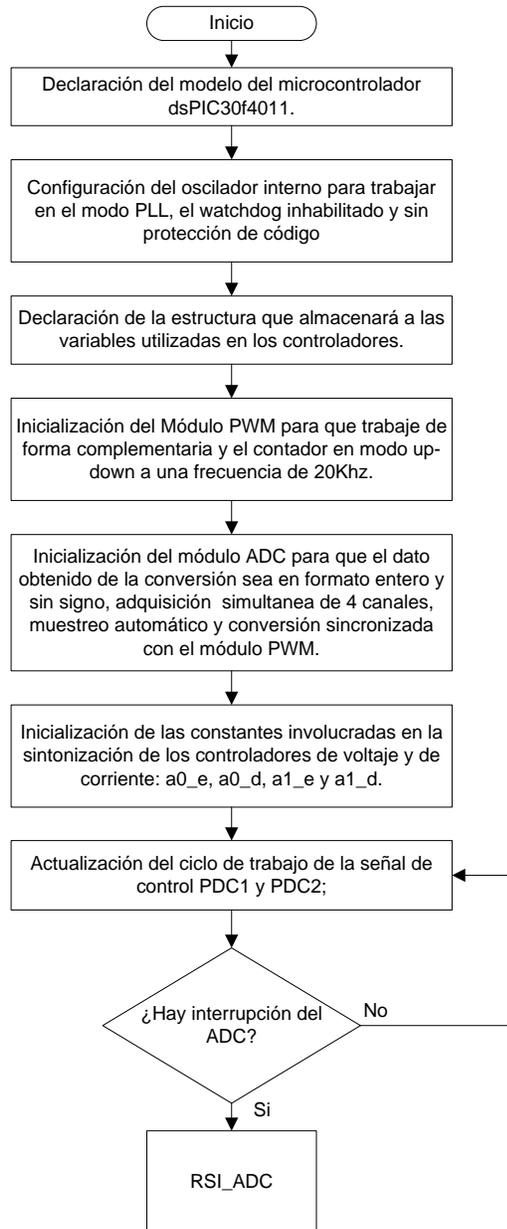


Figura 7 Diagrama de flujo del programa principal utilizando el lenguaje C.

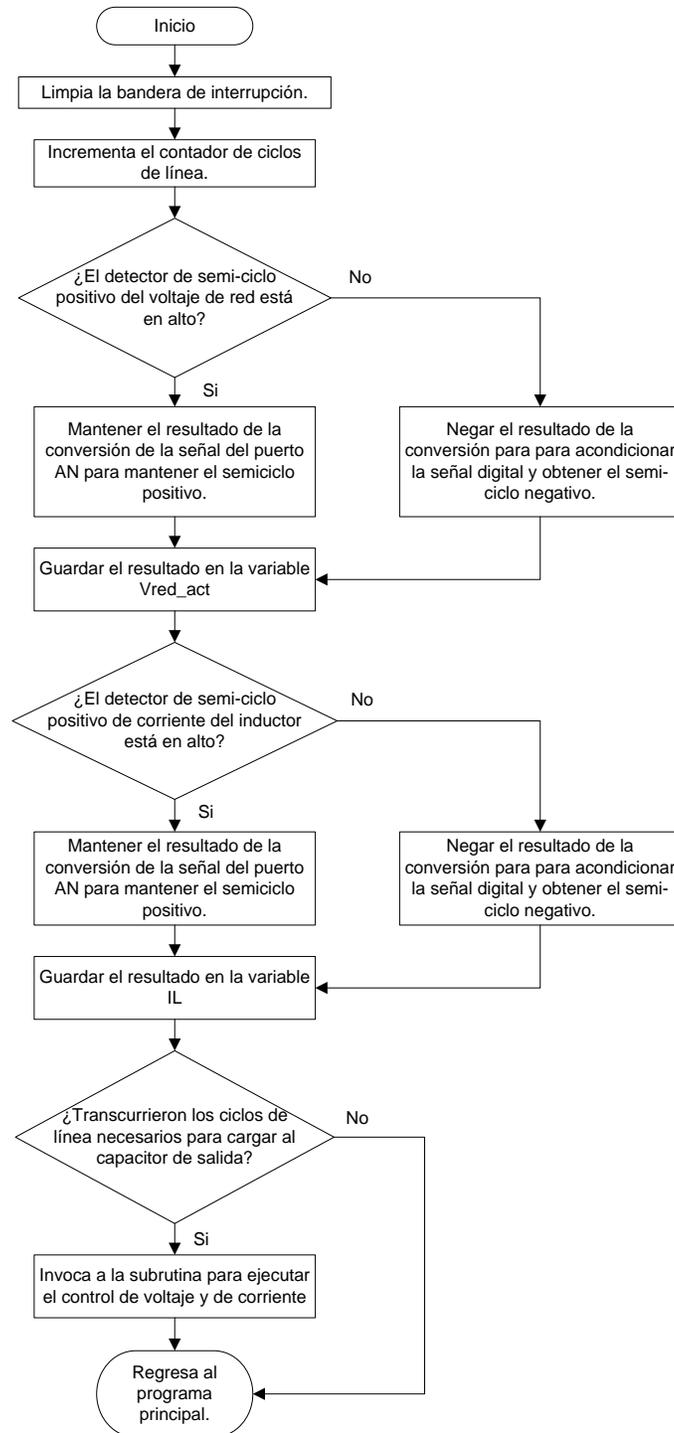


Figura 8 Diagrama de flujo de la subrutina de control de la interrupción del ADC.

El valor de las señales de referencia  $v_r$  y  $-v_r$  se cargan a los registros PDC1 y PDC2, respectivamente. Con el resultado de la comparación de estas señales se obtienen los pulsos de control de los cuatro transistores.

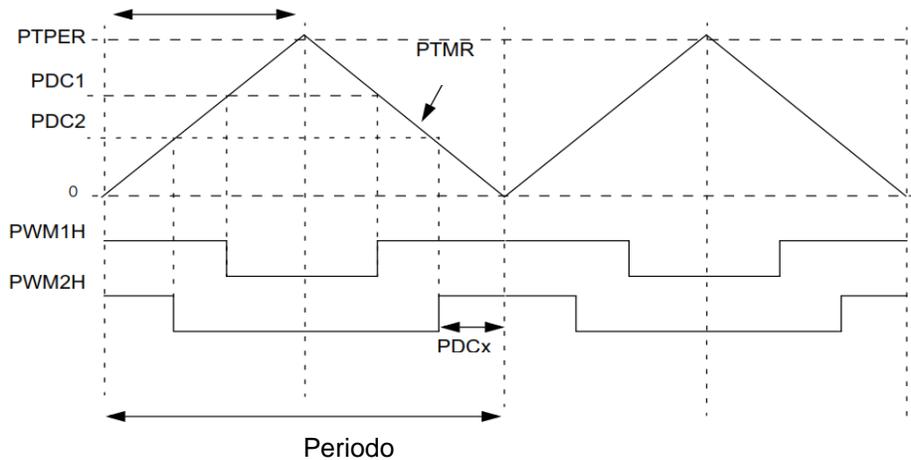


Figura 9 Generación de pulsos de control de transistores, modulación senoidal.

Para la implementación de los controladores PI se utilizó una estructura canónica directa, figura 10, en donde se aprovechó la capacidad del microcontrolador para efectuar multiplicaciones en un ciclo de reloj utilizando las instrucciones MCU. Con las instrucciones MCU, el microcontrolador solamente trabaja con números enteros, por lo que se aplicaron algunos artificios computacionales para la multiplicación con números fraccionarios, los cuales son empleados en las ganancias para la sintonización de los controladores  $a_0$  y  $a_1$  [8].

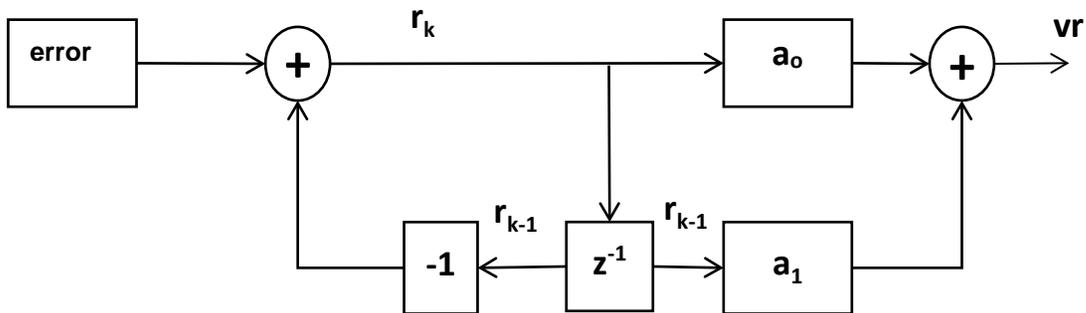


Figura 10 Estructura canónica directa para la implementación del controlador PI.

### 3. Resultados

En la figura. 11 se muestran las formas de onda de la corriente y el voltaje de línea, canal 4 y 3, respectivamente. Se puede apreciar que la corriente tiene una

forma de onda senoidal y se encuentra en fase con el voltaje, por lo que el factor de potencia es unitario. El canal M, corresponde a la forma de onda de la potencia de entrada, los valores que presenta son solamente positivos, por lo que el convertidor está demandando solamente potencia activa. La forma de onda del canal 2, corresponde a la señal de voltaje que proporciona un sensor en la etapa de acondicionamiento de señal.

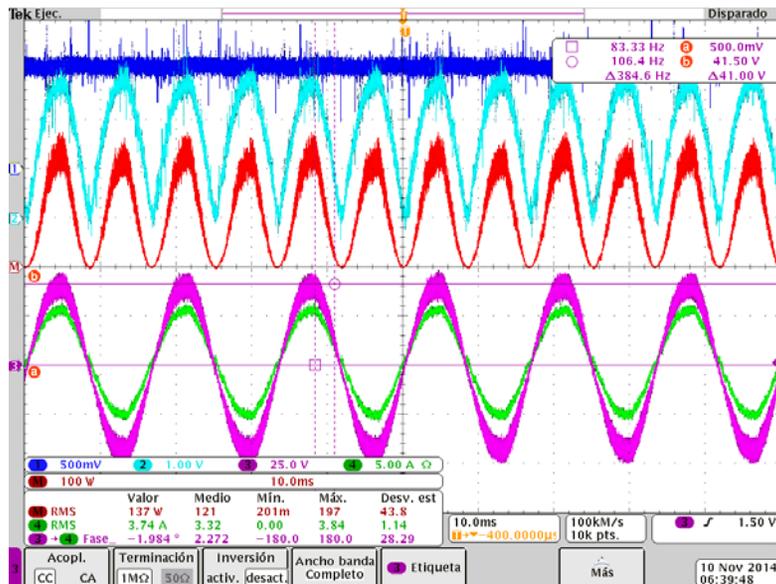


Figura 11 Potencia de entrada y voltaje de salida, rectificador operando en lazo cerrado.

En la figura 12 se muestra las respuestas de la potencia, corriente y voltaje de entrada del rectificador PWM ante una perturbación en la carga, se puede apreciar que la corriente y el voltaje se mantienen en fase provocando que la potencia siga manteniendo solamente valores positivos.

Se demandó una potencia de 1 kW al rectificador y permanece la forma de onda senoidal en fase con el voltaje de línea como se muestra en la figura 13. La corriente corresponde al canal 4 y el voltaje al canal 3. En la misma figura se muestra la forma de onda de la potencia de entrada, la cual sigue tomando solamente valores positivos indicando que no se está demandando potencia reactiva a la línea. En el canal 2 se muestra el voltaje de salida del rectificador,

debido a que se demanda 1KW en la forma de onda de este voltaje se manifiesta un rizo a 120 HZ, el doble de la frecuencia de línea.

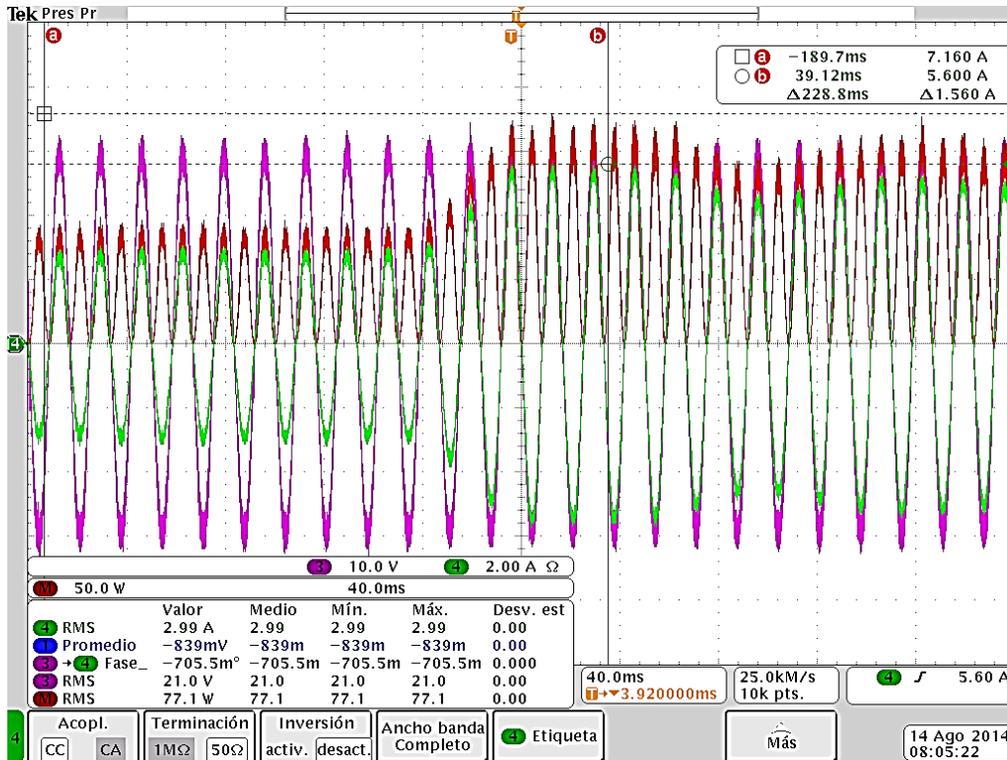


Figura 12 Rectificador operando en lazo cerrado ante una perturbación en la carga.

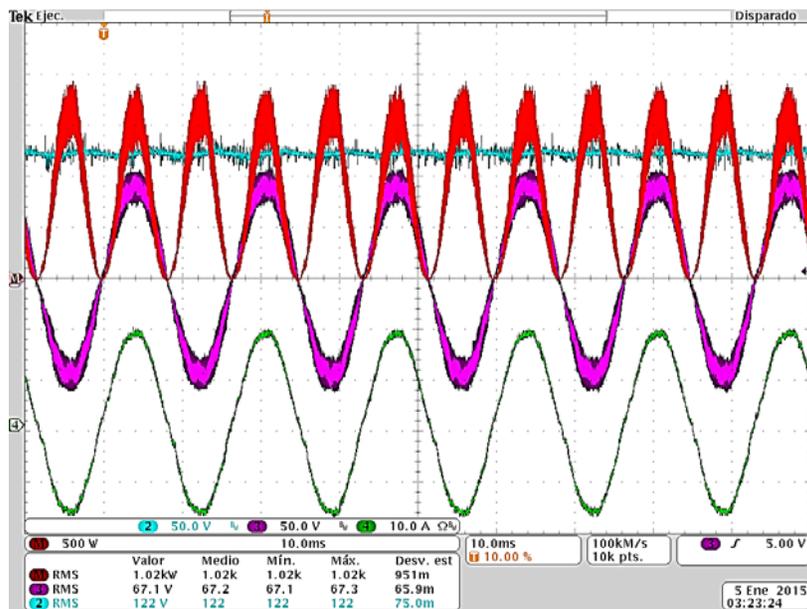


Figura 13 Potencia de entrada y voltaje de salida con rectificador en lazo cerrado.

## **4. Discusión**

A pesar de que el software utilizado para el desarrollo del controlador digital no cuenta con una herramienta para el monitoreo gráfico de las respuestas de las señales involucradas en cada bloque del controlador, se logró sintonizar el lazo de control de corriente y el lazo de control de voltaje con ayuda de la respuesta de las señales de potencia en el rectificador PWM; particularmente la señal de corriente fue la que se comportaba más inestable ante las variaciones en las ganancias de los controladores. Una vez encontradas las ganancias de manera empírica se caracterizó el rectificador PWM a potencias cada vez mayores hasta llegar a 1 kW. Una vez alcanzada la potencia máxima se sometió a perturbaciones en el voltaje de entrada y en la carga, comportándose de manera satisfactoria el sistema.

## **5. Conclusiones**

Con un dispositivo programable de bajo costo fue posible implementar un controlador de voltaje y uno de corriente para un rectificador PWM, se obtuvo un factor de potencia alto gracias a que se forzó a la forma de onda de corriente a ser senoidal y además que estuviera en fase con el voltaje de línea, el voltaje de salida del convertidor trata de mantenerse ante perturbaciones en la carga y variaciones del voltaje de entrada. Con el uso de microcontroladores de propósito específico se pueden implementar técnicas de control para convertidores de potencia, logrando de esta manera disminuir el costo de un producto que se pretende sacar al mercado.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Grman, L., Hraško, M., Kuchta, J., Buday J., Single phase pwm rectifier in traction application, journal of electrical engineering, vol. 62, no. 4, 2011, 206–212.
- [2] Balamurugan, R., Gurusamy, G., Harmonic Optimization by Single Phase Improved Power Quality AC-DC Power Factor Corrected Converters, 2010, International Journal of Computer Applications (0975 – 8887), Volume 1, No. 5

- [3] Rodríguez, J.R.; Dixon, J.W.; Espinoza, J.R.; Pontt, J.; Lezana, P., "PWM regenerative rectifiers: state of the art", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* Volume 52, Issue 1, Feb. 2005. Page(s): 5 – 22.
- [4] Pérez R. Javier, Núñez G. Ciro A. y Cárdenas G. Víctor M. Control lineal para un rectificador monofásico PWM puente completo. *RIEE&C*, revista de ingeniería eléctrica, electrónica y computación, vol. 7 no. 2, diciembre 2009.
- [5] Rashid Muhammad H. *Electrónica de Potencia Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*, Tercera Ed., Pearson, Prentice Hall, 2004.
- [6] O. Stihl. A single-phase controlled current PWM rectifier. *IEEE transaction on power electronics*. Vol3, No. 4, 1988.
- [7] Hoja de datos del microcontrolador dsPIC30F4011, Microchip Technology Inc., 2005.
- [8] Ibrahim, D., *Microcontroller Based Applied Digital Control*, 2006, John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 0-470-86335-8.

# **FIXTURA DE PRUEBA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE CONTROLADORES PARA CONVERTIDORES BIDIRECCIONALES CA-CD**

***Julio Ortega Alejos***

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato  
*j.ortega@itsur.edu.mx*

***Leonel Estrada Rojo***

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato  
*l.estrada@itsur.edu.mx*

***Alejandro Aguilar Ibarra***

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato

***Luis Gerardo López Álvarez***

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato

***Luis David Pérez Vera***

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato

## **Resumen**

La corrección del factor de potencia y la elevación de voltaje en el bus de CD son las principales prestaciones de los convertidores electrónicos bidireccionales CA-CD; Para obtenerlas, se deben de implementar técnicas de control que utilizan lazos de retroalimentación de corriente y de voltaje. Cuando en la práctica se sintonizan los controladores en convertidores que trabajan en el orden de los Kilo Watts y se determina el porcentaje de variación del voltaje de línea que soporta el convertidor, la corriente de línea pierde completamente su estabilidad y provoca que los módulos de IGBTs o MOSFETs de potencia se dañen permanentemente junto con sus impulsores. Esto se traduce en pérdidas económicas substanciales en cada prueba; En este documento se propone una fixtura de prueba que emula

la línea eléctrica para caracterizar los controladores de convertidores bidireccionales, sin exponer sus componentes electrónicos.

**Palabra(s) Clave(s):** emulador de línea eléctrica, inestabilidad, perturbación, señal de control, sintonización de controladores.

## 1. Introducción

La figura 1 muestra el circuito del rectificador PWM monofásico totalmente controlado conectado en puente, el cual utiliza cuatro interruptores de potencia con diodos conectados en anti-paralelo para obtener un voltaje de cd controlado,  $V_o$ . Para la operación apropiada de este rectificador, la magnitud del voltaje de salida debe ser mayor que la del voltaje de entrada en cualquier momento posterior al transitorio de arranque [1, 2, 3].

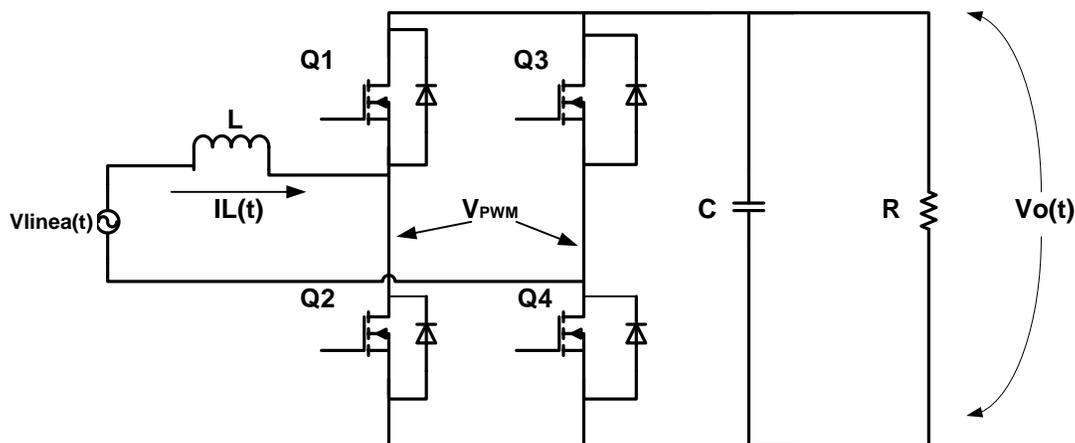


Figura 1 Rectificador PWM monofásico en conexión puente.

El principio de funcionamiento del rectificador PWM se basa en la operación de un convertidor BOOST, el cual pertenece a la familia de convertidores de transferencia de energía indirecta. El procesamiento de la potencia involucra una fase de almacenamiento y una de liberación de energía. Durante el tiempo de encendido de un par de transistores (Q1 y Q3 ó Q2 y Q4) el inductor almacena energía y el capacitor por si solo suministra energía a la carga.

Cuando conducen los transistores Q1 y Q4 ó Q3 y Q2, la energía almacenada en el inductor aparece en serie con la fuente de alimentación y contribuye a suministrar energía al capacitor y a la carga, figura 2.

Esta configuración del rectificador PWM proporciona una corriente de entrada no pulsante en el modo de operación de conducción continua y hace de ésta una topología de bajo rizo en la corriente de entrada gracias a que un inductor se opone a variaciones rápidas de la corriente.

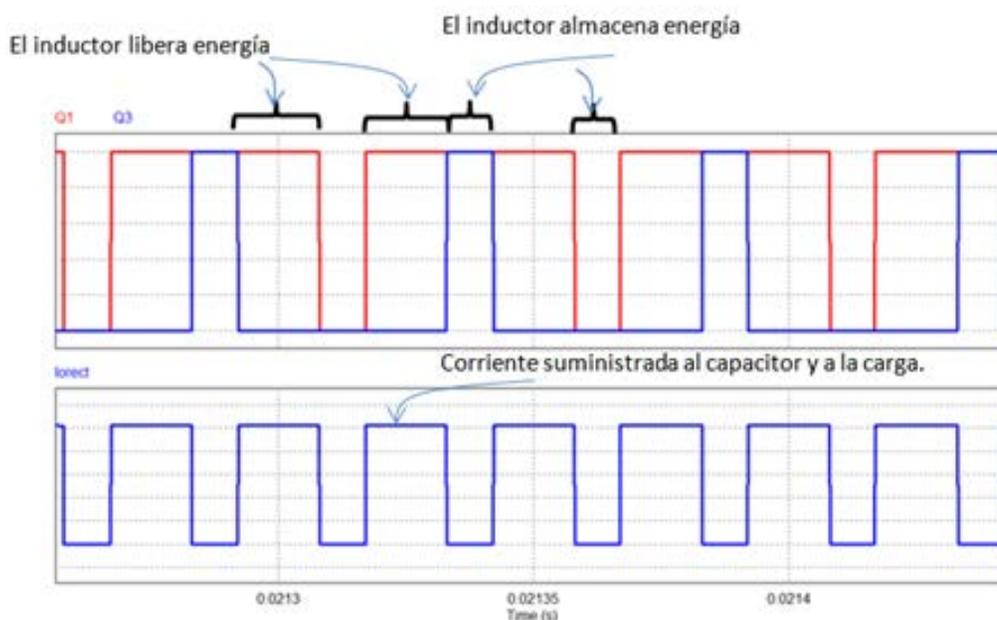


Figura 2 Ondas de señales de activación y de corriente de alimentación del capacitor.

Los posibles estados de conmutación de los interruptores con los que puede operar el rectificador PWM se identifican de acuerdo al nivel de voltaje establecido entre los puntos a' y b', conocido como VPWM y son los siguientes:

1. Q1 y Q4 están encendidos, Q2 y Q3 están apagados; por lo que  $VPWM = V_o$  y se proporciona energía al capacitor y a la carga.
2. Q1 y Q4 están apagados, Q2 y Q3 están encendidos; por lo que  $VPWM = -V_o$  y se proporciona energía al capacitor y a la carga.
3. Q1 y Q3 están encendidos, Q2 y Q4 están apagados; por lo que  $VPWM = 0$ .  
O bien, Q1 y Q3 están apagados, Q2 y Q4 están encendidos; por lo que  $VPWM = 0$  y se almacena energía en el inductor.

Para obtener dichos estados de conmutación se utiliza una modulación senoidal, en donde se hace variar el ancho de cada pulso en proporción con la amplitud de una onda senoidal evaluada en el centro del mismo pulso. Las señales de control se generan comparando una señal senoidal de referencia de frecuencia  $f_r$  con una onda portadora triangular de frecuencia  $f_c$ , figura 3.

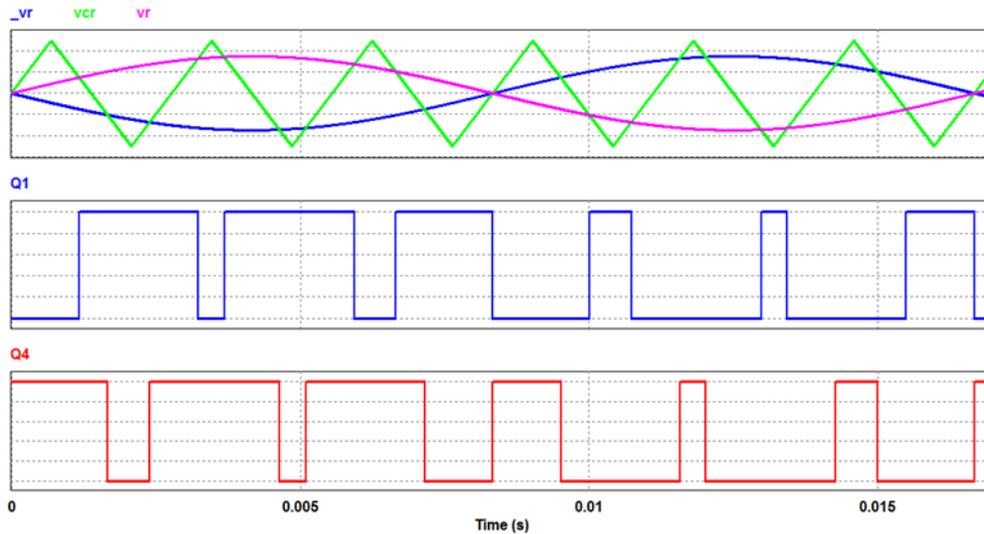


Figura 3 Señales de control de interruptores a partir de modulación senoidal.

La amplitud pico de la señal de referencia controla el índice de modulación de amplitud  $m_a$  y en consecuencia el voltaje de salida del convertidor. Al comparar la señal portadora bidireccional  $v_c$ , con dos señales de referencia,  $v_r$  y  $-v_r$ , se producen las señales de disparo de los transistores Q1 y Q4 respectivamente.

Las señal de disparo del transistor Q2 es el complemento de Q1 y la de Q3 el complemento de Q4. La cantidad de pulsos por ciclo la establece el índice de modulación de frecuencia ( $M_f$ ) que se encuentra en función de las frecuencias de la señal portadora de las señales de referencia.

$$M_f = \frac{f_c}{f_r} \quad (1)$$

Cuando es  $M_f$  es mayor a 21 se dice que se tiene un rectificador muy modulado y cuando es menor se dice que está poco modulado [5].

## Control del rectificador PWM

El esquema de control clásico se muestra en la figura 4. El control incluye un controlador de voltaje en cascada con uno de corriente [6]. Típicamente es un controlador proporcional- integral (PI), el cual controla la cantidad de potencia requerida para mantener el voltaje de salida de CD ( $V_o$ ) constante. El controlador de voltaje proporciona el punto de ajuste de la amplitud de la corriente de entrada. Por esta razón, la salida del controlador de voltaje se multiplica por una señal senoidal con la misma fase y frecuencia del voltaje de la red,  $v_s(t)$ , a fin de obtener la referencia de la corriente de entrada,  $i_{sref}$ .

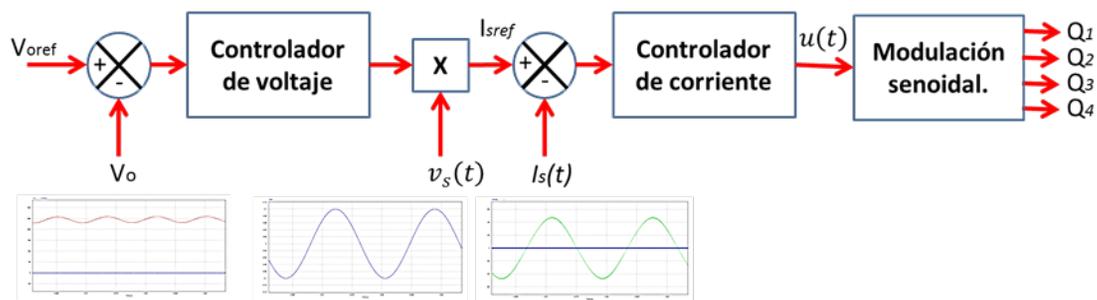


Figura 4 Esquema de control clásico para el rectificador PWM.

El controlador de corriente proporciona la señal de control que determinará el índice de modulación de amplitud. La rápida respuesta del controlador de corriente, provoca que se obtenga un alto factor de potencia en la entrada del convertidor.

El voltaje de salida del rectificador,  $V_o$ , presentará un rizo con una frecuencia igual al doble de la frecuencia de línea. Si este rizo pasa a través del controlador de voltaje, producirá una componente del tercer armónico en la corriente de entrada. La amplitud de este armónico se puede atenuar con un filtro pasa bajas en la retroalimentación del voltaje de salida,  $V_o$ .

## Diseño del convertidor

El sistema está conformado principalmente por la etapa de potencia que se encargará de realizar la conversión de energía alterna a continua a través del

rectificador PWM, el cual es comandado por las señales provenientes de la etapa de control en donde se implementan en un micro-controlador los algoritmos para la regulación de voltaje y corriente, tal como se muestra en la figura. 5.

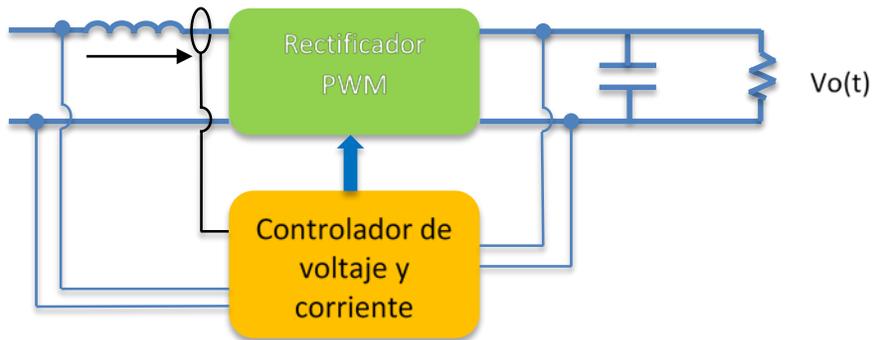


Figura 5 Diagrama a bloques del Rectificador PWM en lazo cerrado.

En la figura 6 se muestra el prototipo del convertidor diseñado para 2 kW de potencia; se utilizaron módulos de IGBTs cuyo precio oscila en \$50 dólares, los impulsores para disparar a los IGBTs utilizan fuentes de alimentación aisladas que cuestan alrededor de 10 dólares cada una y también se necesitan optoacopladores de alta velocidad que cuestan 3 dolares cada uno. Si llega a dañarse el módulo de IGBTs, se dañan también los componentes de los impulsores, esto quiere decir que por cada prueba destructiva se pierden \$102 dólares para un prototipo de baja potencia.



Figura 6 Prototipo del convertidor CA-CD bidireccional.

Cuando se sintoniza el controlador, el sistema llega a tener perturbaciones que provocan la destrucción de los componentes más sensibles (IGBTs e impulsores); Una vez sintonizado el controlador y se desea determinar el rango de variación de voltaje de línea que soporta el convertidor, éste no solo deja de mantener el voltaje del bus de CD constante, la corriente de línea senoidal y en fase con el voltaje de entrada, como lo hace en lazo abierto, sino que la corriente se deforma completamente dejando de ser senoidal y de magnitud no determinada (normalmente de magnitud que triplica a lo que se demanda de forma controlada), provocando el deterioro y destrucción del convertidor.

En la figura 7 se muestra el momento en el que se arranca el convertidor controlado, con un voltaje de línea por debajo del rango de variación aceptado, se puede observar que la forma de onda de la corriente de línea carece de simetría y presenta valores por arriba de su magnitud en estado estable (señal verde, canal 4), mientras que el voltaje de salida en el bus de CD presenta una variación en su magnitud (señal rosa canal 3). Cuando se incrementa el voltaje de línea con el variac, el convertidor se estabiliza y la corriente es senoidal.

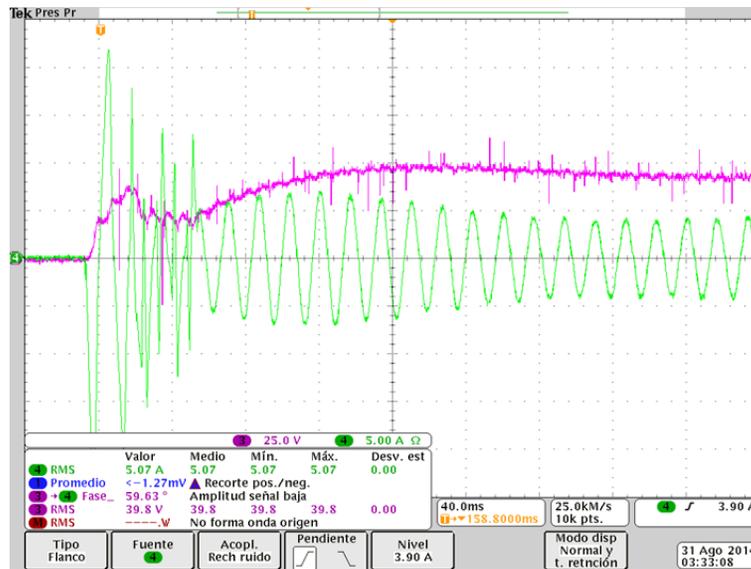


Figura 7 Prototipo del convertidor CA-CD bidireccional.

En la figura 8, se muestra otro arranque del convertidor controlado, pero ahora con un voltaje de línea dentro del rango de variación tolerado por el convertidor, se

puede apreciar que aunque se demandó mayor corriente de línea, la forma de onda inició senoidal y así se mantuvo durante el cambio de carga.

Las pruebas experimentales que se presentan son con niveles bajos de potencia, aunque también se realizaron a plena carga, provocando la destrucción del convertidor.

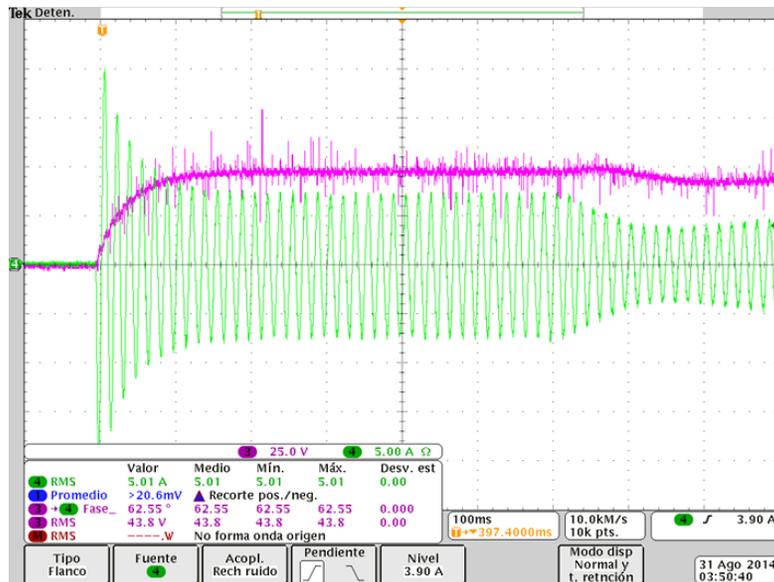


Figura 8 Prototipo del convertidor CA-CD bidireccional.

Con estas evidencias que se han mostrado se justifica la necesidad de una fixtura de prueba que permita caracterizar al controlador ante diferentes escenarios en las magnitudes y fase de la corriente y voltaje de línea, a través del comportamiento de las señales de control que provocan la inestabilidad del sistema; De esta manera se podrían implementar protecciones por hardware o software antes de caracterizar el controlador directamente con la línea.

## 2. Desarrollo

En la figura 9 se presenta la propuesta de la fixtura de prueba, en donde ya no es necesario demandar los niveles de voltaje y corriente a plena carga para determinar el comportamiento del controlador del convertidor, ahora mediante una computadora se pueden emular las señales de voltaje y corriente de línea; se

pueden establecer diferentes escenarios a los que puede estar sometido el controlador, entre los que destacan: defasamiento entre la corriente y voltaje de línea para la prueba como inversor y como rectificador, generación de armónicos, variación en la amplitud del voltaje y corriente de manera independiente para simular cambios de carga, principalmente.

Como interfaz entre la computadora y el controlador (figura 9) se utiliza el dispositivo programable myRIO de National Instruments (NI) y la interfaz gráfica de usuario se desarrolló utilizando LabVIEW de NI.

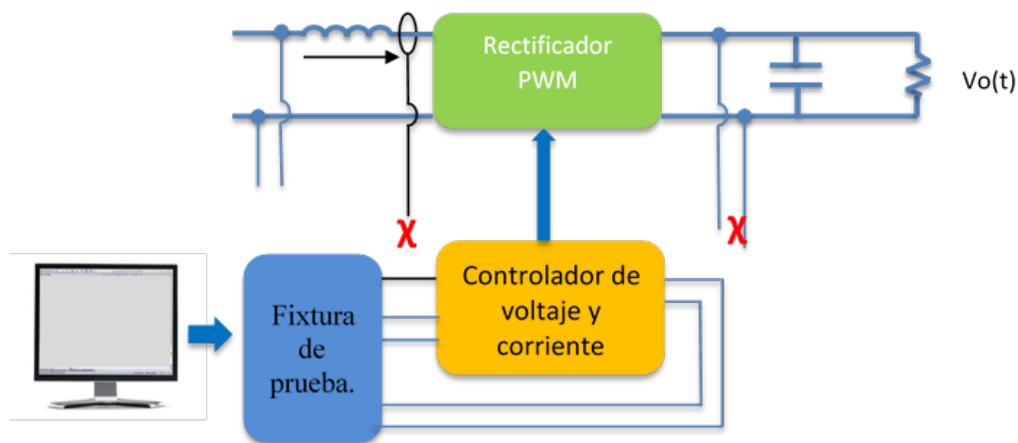


Figura 9 Propuesta de la fijatura de prueba de controladores.

El dispositivo NI myRIO es un hardware embebido que posee internamente un procesador y un FPGA, así como los periféricos de módulos de entrada-salida analógicos y digitales, ADC, tarjeta WIFI, entre otras prestaciones. El proyecto se comenzó a desarrollar en la plataforma de LabVIEW utilizando los bloques de funciones de NI myRIO 2015 trabajando sobre la FPGA del dispositivo

En la figura 10 se muestra la configuración correspondiente al voltaje de línea emulado con armónicos, donde se configura la frecuencia fundamental que será la misma para el voltaje y la corriente, el defasamiento, el offset, y el factor de escala, donde el defasamiento se encuentra en el dominio del tiempo; como el voltaje es la señal de referencia su defasamiento es de cero y su offset es de 2048 para que la señal se pueda exportar bien, ya que las salidas de la MyRio son

salidas positivas. El factor de escala es la amplitud de la señal, y los demás armónicos son el tercer, quinto, séptimo y noveno armónico, los valores son del 0 a 1, donde 1 es la amplitud máxima del armónico.

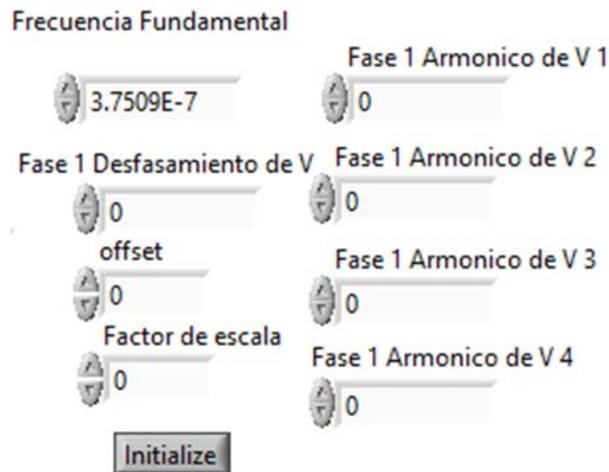


Figura 10 Configuración de la primera señal con los armónicos en FPGA.

Al igual que la señal de voltaje de línea, en la segunda señal (la corriente de línea), se configuran los valores del desfasamiento de 0 a 0.999 correspondientes a una variación de 0° a 360°, el offset también se ajusta a 2048, el factor de escala modifica el valor de la amplitud, los armónicos que se pueden agregar son el tercer, quinto, séptimo y noveno, figura 11.

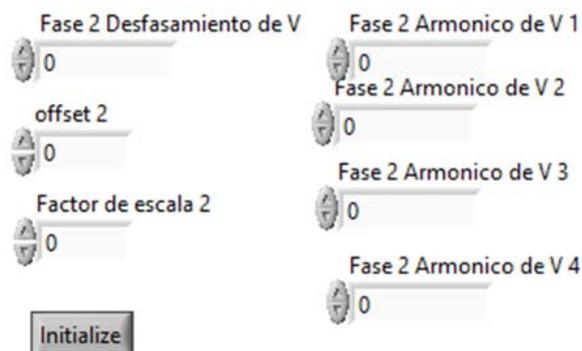


Figura 11 Configuración de la segunda señal con los armónicos en FPGA.

En la figura 12 se muestra el generador de señal senoidal en la FPGA, al cual se le proporcionan los valores de frecuencia (definidos por periodo sobre ticks, donde

los ticks corresponden a la velocidad del oscilador), también se le agrega el periodo y el defasamiento.

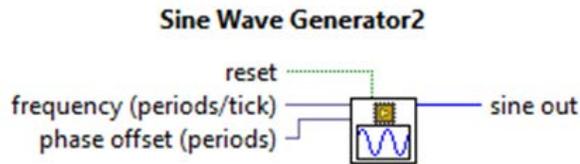


Figura 12 Generador de señal senoidal en FPGA.

En la figura 13 se muestra el generador de señal de la fundamental, donde los valores que se proporcionan son la frecuencia fundamental, el valor de defasamiento, la salida de la señal se le suma un valor de offset de 2048, esto por motivo que la salida de MyRio es salida positiva no tiene negativos, por lo que se le suma un offset para que esta señal solo entregue valores positivos, el valor resultante se multiplica por el factor de escala, el cual es la amplitud de la señal, el valor resultante, se le sumaran los armónicos.

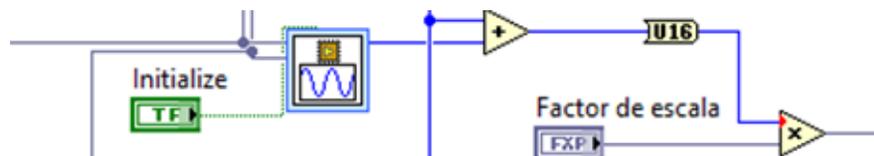


Figura 13 Señal fundamental.

Para agregar el contenido armónico a las señales fundamentales, se utilizaron más bloques de funciones senoidales de las herramientas de la FPGA, pero ésta vez la frecuencia multiplicada por múltiplos impares a la fundamental (armónico 1, 3, 5, etc.) y sumados a la fundamental. De manera que en la interfaz de usuario se puede agregar un armónico específico a cada fase con su respectiva amplitud.

En la figura 14 se muestran el generador de armónicos, el armónico 1 es 3 veces la frecuencia fundamental, el armónico 2 es 5 veces la frecuencia fundamental. En la figura 14 se genera el noveno armónico, por lo que el valor de la frecuencia se multiplica por 9 para tener 9 veces la frecuencia de la fundamental, este valor se agrega a un generador de señal para obtener la señal senoidal a 9 veces la

frecuencia de la fundamental, a este valor de salida se le multiplica por un factor de escala de este armónico, que se le suma a la salida de la fundamental.

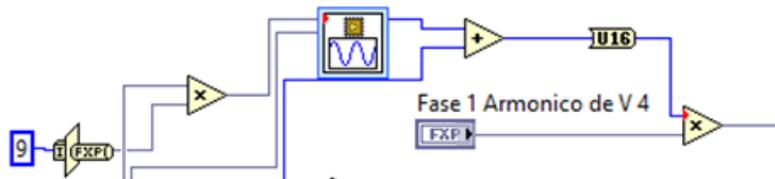


Figura 14 Armónico que se le agrega a la señal fundamental.

En la figura 15 se muestra la interfaz de usuario en el microprocesador de la MyRio, el cual es el panel donde el usuario interactuara con el programa, en panel se puede observar los controladores como factor de escala 1, factor s escala 2, y factor de escala 3, que corresponden a las amplitudes de las señales fundamentales, el número corresponde a la señal que se desea manipular. Se puede modificar la frecuencia fundamental, de igual forma se presentan los controladores de los armónicos, en porcentaje, los primeros 4 son para la primera señal, los de en medio para la segunda señal y los últimos para una tercer señal.



Figura 15 Interfaz de usuario del emulador.

Es necesario señalar que la amplitud de los armónicos no debe ser mayor a 1 (por el tipo de datos que acepta el bloque para la generación de la onda senoidal), ya que de lo contrario se puede saturar la señal esto debido a las limitaciones de la myRIO.

En la figura 16 se muestra el código en el microprocesador donde se inicia llamado el código de la FPGA, y se llama a los componentes que lo componen, de esta

forma a todos los controladores se les cargarán los valores directamente desde el microprocesador, algunos valores fijos se le cargan mediante constantes, mientras que los valores variables con controladores que se modifican su valor desde el panel frontal.

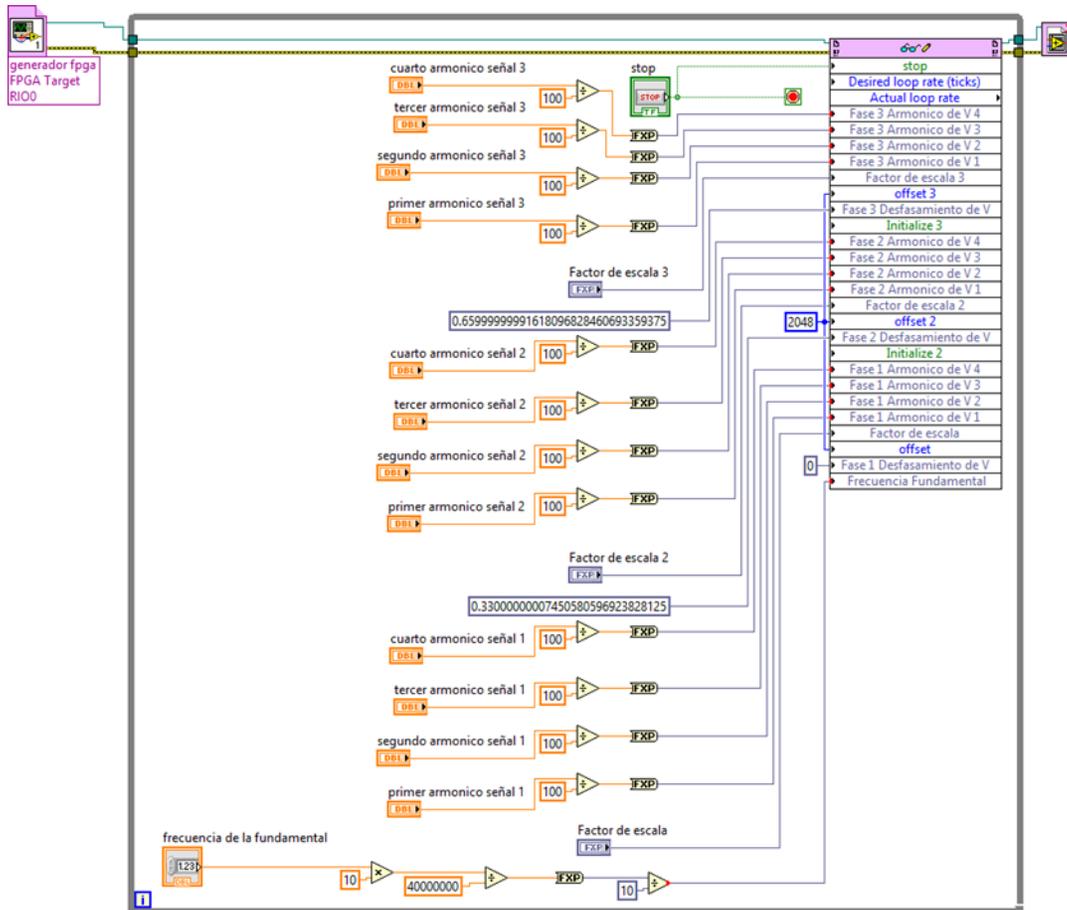


Figura 16 Código en el microprocesador.

Para los valores de los armónicos, se dividió el valor que se desea entre 100 para de esta forma sólo tener valores e 0 a 1, ya que ese es el valor que acepta el generador de señal. Luego este valor se cambia de punto flotante a punto fijo, que es el valor que acepta el generador, esto se utiliza para todos los armónicos de las 3 señales. De igual forma el valor de la frecuencia se cambia a punto fijo. Y los valores de factor de escala de las señales también están en punto fijo.

### 3. Resultados

Con fin de probar el emulador diseñado se utilizó otra PC, para poder adquirir las señales generadas. Para la adquisición se realizó un programa basado en Labview utilizando otro dispositivo myRIO, esto el fin de obtener la menor cantidad de errores debido a la adquisición o al dispositivo de adquisición. Cabe señalar que se usó la myRIO debido a su superioridad (capacidad de procesamiento, mayor resolución y mayor número de muestras por segundo) frente a otros dispositivos de adquisición como lo pueden ser las tarjetas DAQ.

En la figura 17 se presentan las señales generadas, pero en este caso solo se presentan armónicos en una de ellas, esta señal cuenta con los primeros 2 armónicos (3er y 5to armónicos) por lo que la señal se deforma de tal manera que ya no es una señal senoidal. También se puede apreciar que se puede realizar el defasamiento entre las señales tomando a una como referencia.

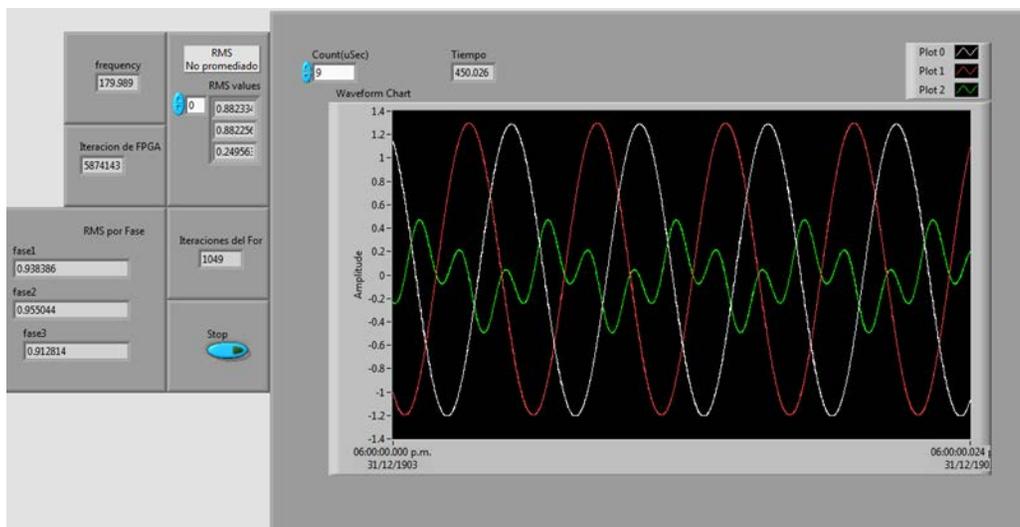


Figura 17 Adquisición de las señales generadas con armónicos en una de las fases.

### 4. Discusión

Con la fixtura propuesta se pueden emular diferentes escenarios a los que puede estar sometido un controlador de un convertidor de potencia, los cuales servirán para determinar los niveles de las señales involucradas en cada bloque del controlador para poder establecer límites por software, alarmas o protecciones

previas a la prueba en línea cuando se estén haciendo ajustes durante la sintonización.

Se podrán analizar también las señales de conmutación de los transistores que provocan la destrucción del prototipo ante variaciones del voltaje de línea; Con esta pre caracterización se podrán determinar los niveles en los acondicionadores de señal que disparen las protecciones ante perturbaciones de línea, SAGS o SWELLS. La prueba de un controlador no está contemplado en este documento.

## **5. Conclusiones**

Ante las pérdidas económicas que significa cada prueba destructiva de un convertidor bidireccional, en este trabajo se presentó la necesidad de una fixtura de prueba para la caracterización de controladores. La fixtura propuesta genera señales de voltaje variantes con el tiempo que emulan el comportamiento de la corriente y voltaje de línea. Las pruebas del controlador con la fixtura eliminan la incertidumbre y el estrés que se manifiestan durante las pruebas con niveles de potencia en el orden de los kW.

Desde el punto de vista académico resulta también una herramienta muy útil, ya que los estudiantes podrán hacer uso de esta fixtura para la caracterización de controladores y entender la interacción entre lazos de control en cascada o anidados en las materias de Control, Sistemas Lineales, Electrónica de potencia, entre otras.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Grman, L., Hraňsko, M., Kuchta, J., Buday J., Single phase pwm rectifier in traction application, journal of electrical engineering, vol. 62, no. 4, 2011, 206–212.
- [2] Balamurugan, R., Gurusamy, G., Harmonic Optimization by Single Phase Improved Power Quality AC-DC Power Factor Corrected Converters, 2010, International Journal of Computer Applications (0975 – 8887), Volumen1 – No. 5.

- [3] Rodríguez, J.R.; Dixon, J.W.; Espinoza, J.R.; Pontt, J.; Lezana, P., "PWM regenerative rectifiers: state of the art", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* Volume 52, Issue 1, Feb. 2005. Page(s): 5 – 22.
- [4] Pérez R. Javier, Núñez G. Ciro A. y Cárdenas G. Víctor M. Control lineal para un rectificador monofásico PWM puente completo. *RIEE&C, revista de ingeniería eléctrica, electrónica y computación*, vol. 7 no. 2, diciembre 2009.
- [5] Rashid Muhammad H. *Electrónica de Potencia Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*, Tercera Ed., Pearson, Prentice Hall, 2004.
- [6] O. Stihl. A single-phase controlled current PWM rectifier. *IEEE transaction on power electronics*. Vol3, No. 4, 1988.

# PLATAFORMA DE MONITOREO DE UN SISTEMA EÓLICO UTILIZANDO EL MÉTODO DE APRENDIZAJE “PROJECT-ORIENTED PROBLEM-BASED”

***Julio Cesar Peña Aguirre***

Instituto Tecnológico de Celaya

*julio-cesar-barca@hotmail.com*

***Alonso Alejandro Jiménez Garibay***

Instituto Tecnológico de Celaya

*alonso.jimenez@itcelaya.edu.mx*

## **Resumen**

Alrededor del mundo existen en la literatura diferentes esfuerzos por promover la educación en lo que respecta a energías renovables; los programas académicos deben enfrentar el desafío con nuevas estrategias educativas que ofrezcan una visión contextual del proceso de enseñanza-aprendizaje. En este artículo se describe una metodología guiada, “estudiante-facilitador”, basada en el aprendizaje Project-Oriented Problem-Based (POPB), que tiene como fin el desarrollo de una plataforma de monitoreo para medir las señales de interés relacionadas con la parte eléctrica de un sistema de conversión de la energía del viento (Wind Energy Conversion System, WECS, por sus siglas en inglés). El principal objetivo para el alumno es entender el funcionamiento típico de un WECS en estado estacionario y relacionarlo con problemas actuales durante condiciones transitorias o de perturbación. La metodología propuesta permite a los estudiantes el uso de conocimientos adquiridos en otras asignaturas y orientarlos hacia la resolución de problemas técnicos, así como el desarrollo de habilidades personales. Por último la evaluación se centra en el rendimiento del sistema implementado y el desarrollo de las competencias del estudiante.

**Palabra(s) Clave(s):** educación, energía eólica, monitoreo, Project-Oriented Problem-Based Learning (POPBL).

## 1. Introducción

Debido al creciente impacto de la producción de energía eólica en estructuras energéticas globales y los requisitos de un sistema de conversión de energía eólica (WECS) relacionados con la alta confiabilidad y economía, tales como la caracterización de fallas [1] y dificultades de mantenimiento [2], es esencial aplicar estrategias de enseñanza para potenciar la formación integral y multidisciplinaria en la enseñanza de la ingeniería [3].

Project-Oriented Problem-Based (POPB) es una estrategia educativa diseñada para crear un ambiente de aprendizaje contextual para que el alumno inicie con el análisis de un problema de investigación seguido por un proyecto de le dará una solución específica a través de una metodología basada en: planificación, orientación y asesoramiento [4].

En contraste con Project ó Problem-based learning (POL), POPB se centra en la formulación del problema a partir del estudiante mediante el desarrollo del tema y en el papel del facilitador para orientar un proyecto que genere alternativas de solución [5]. Sus características tienden a favorecer en el desarrollo de habilidades de aprendizaje, desarrollo de habilidades multidisciplinarias, así como la aplicación de conocimientos adquiridos durante sus estudios en la ingeniería.

En la literatura se reportan varios trabajos acerca de estrategias educativas en plataforma experimentales, Kumar et al [6] en 2013 usa el concepto Project- Based Learning para la implementación de una plataforma educativa focalizada en sistemas embebidos utilizando FPGAs, Duran et al [7] en el 2013 se propone un enfoque pedagógico que consta de dos partes: la primera crea un fondo teórico y una descripción del estado del arte de WECS y la segunda parte trata de la simulación de un motor síncrono de imán permanente (PMSG, por sus siglas en inglés), y un sistema de potencia basado en el control de campo orientado, Santos-Martin et al [8] en 2012, propone la aplicación de Problem-Based Learning en estudiantes de maestría para obtener soluciones a la respuesta de un sistema con un generador doblemente alimentado (DFIG, por sus siglas en inglés) bajo fallas de tensión de red a través de simulaciones en MATLAB/Simulink y NI LabVIEW.

Arribas et al [9] en 2011 presenta un sistema diseñado para fines educativos y estrategias para el control de un DFIG.

En lo que respecta a plataformas experimentales comerciales, permiten entender los conceptos básicos del WECS, sin embargo son arquitecturas cerradas, por lo que el estudiante difícilmente tiene acceso a componentes vitales del sistema tales como: sensores, tarjetas de adquisición de datos o sistemas de procesamiento digital para la implementación del control, y en algunos casos desconoce las variables que definen el comportamiento estático y dinámico del sistema.

Así, en este artículo se describe una metodología estudiante- facilitador tipo POPB, que consiste en periodos de evaluaciones de competencias, con el fin de generar soluciones a los problemas eléctricos de monitoreo de condiciones relacionadas con DFIG-WECS [10] por medio del diseño e implementación, a partir del estudiante, de una plataforma de monitoreo mediante NI LabVIEW.

## 2. Metodología POPB

La principal contribución de este artículo es la propuesta de una metodología POPB para mejorar el proceso formativo-integral del estudiante en concordancia con los requerimientos de los programas educativos relacionados a través del desarrollo de competencias profesionales, figura 1.

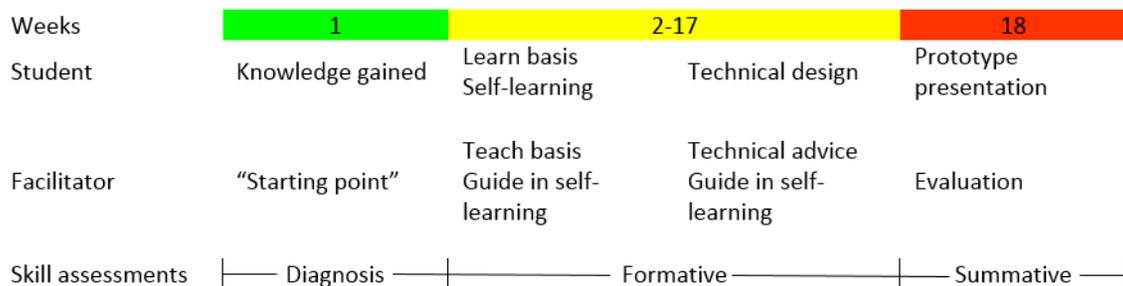


Figura 1 Metodología POPB propuesta.

Las competencias profesionales desarrolladas se clasifican en:

- Habilidades instrumentales
  - Comunicación oral y escrita

- Capacidad de análisis y síntesis
- Capacidad para organizar y planificar
- Conocimientos básicos de Ingeniería Mecatrónica
- Habilidad para buscar y analizar información de diversas fuentes
  - Solución de problemas
  - Toma de decisiones
- Habilidades interpersonales
  - Capacidad crítica
  - Trabajo en equipo
  - Ética profesional
  - Competencias sistemáticas
  - Capacidad de aplicar conocimientos en la práctica
  - Capacidad de aprender
  - Creatividad
  - Innovación
  - Capacidad de trabajar autónomamente
  - Alcanzar los objetivos

El proceso del desarrollo de las habilidades consta en 18 semanas que incluyen: una evaluación diagnóstica, formativa y sumativa.

La figura 1 muestra la metodología POPB propuesta, en un inicio, el papel del facilitador es asumir la responsabilidad del aprendizaje del estudiante a partir de un diagnóstico inicial y con ello definir un "punto de partida".

Durante la etapa formativa el papel del facilitador incluye enseñanza y orientación: en primer lugar presenta una introducción de los WECS, explicando ventajas y desventajas de cada uno.

Paralelamente, el estudiante conoce los fundamentos básicos de los WECS y comienza un período continuo de auto-aprendizaje basado en la búsqueda de literatura relacionada con el tema, en este momento encuentra varios problemas actuales de los WECS: los diferentes métodos para el acondicionamiento y adquisición de señales, métodos alternativos para parametrizar el generador,

problemas relacionados con el comportamiento dinámico del sistema y alternativas mecánicas para mejorar la transferencia de energía. Por lo tanto, el estudiante observa problemas relacionados con el monitoreo de estado y comienza el diseño de un proyecto de DFIG WECS para el análisis y las propuestas de posibles soluciones.

En la segunda etapa, la metodología se centra en el estudiante, quien aplica conocimientos adquiridos durante su formación en ingeniería y los orienta hacia el diseño de una plataforma experimental de DFIG WECS, realizando las siguientes actividades: acondicionamiento y adquisición de señales, lógica de programación y seguimiento de las variables de interés. Mientras que en este punto, el papel del facilitador es mantener la actividad de guía además de un asesoramiento técnico. Finalmente, el facilitador realiza una evaluación del sistema diseñado e implementado, mientras que el estudiante finaliza la metodología con la presentación de un informe escrito y una presentación oral técnica.

### **3. Diseño técnico**

Los sistemas de conversión de energía eólica de velocidad variable se presentan en la actualidad como el sistema más ampliamente utilizado en lo referente a esquemas de generación eléctrica interconectados a la red.

En la etapa de identificación y análisis del sistema eólico, el equipo de trabajo del estudiante nota que un primer problema para entender el comportamiento del sistema es el monitoreo de la señal completa que incluye: tres fases de voltaje y corriente de estator y rotor, la velocidad del eje (rotor), energía activa y reactiva además de la corriente directa (CD), tensión de bus.

Durante la etapa formativa, se presentan varias formas de programación lógica por equipos de trabajo para cumplir la primera etapa del proyecto. Las figuras 2 y 3 muestran la mejor alternativa, basada en un instrumento virtual programado en NI LabVIEW para adquirir y acondicionar las tres fases de voltaje y corriente [10]. Mientras tanto la figura 4 muestra la media cuadrática (RMS) potencia activa y reactiva acondicionado instrumento virtual (VI).

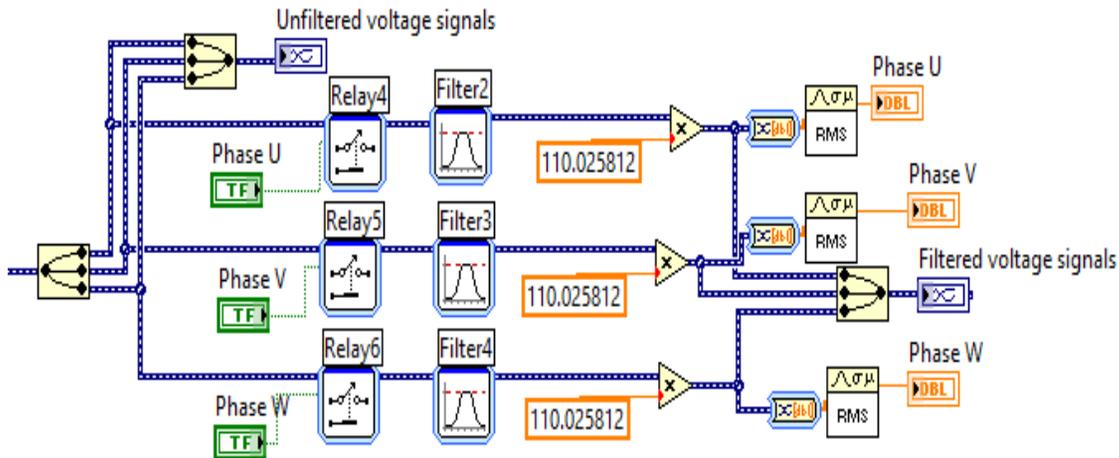


Figura 2 VI para el acondic

La VI propuesto en la figura 2 comienza ionamiento y adquisición de voltaje por fase. con la adquisición de referencias de voltaje por cada fase U, V y W, seguido por un módulo de relés que funcionan permitiendo el flujo de la señal que depende del estado lógico, se aplica un filtro digital a cada señal a través del módulo filter configurado como filtro pasa bajas con frecuencia de corte de 60 Hz , el acondicionamiento del valor del voltaje pico en la medición del sistema se realiza mediante el producto de la señal filtrada y un factor constante, el indicador numérico y gráfico de las tres fases se presentan como señales RMS.

Mientras tanto, la figura 3 muestra el VI para la adquisición de la señal de corriente, el uso de un sensor de efecto Hall para cada fase, el cual requiere un acondicionamiento de la señal debido a la característica de desplazamiento del sensor (2.5 VDC), un arreglo apropiado permite que el eje de amplitud sea modificado a cero, para finalmente obtener el valor RMS de la corriente de entrada. En el caso de potencia activa y reactiva, el monitoreo utiliza un módulo de energía, que permite medir el valor RMS de potencia activa, reactiva y aparente. Sin embargo, mediante una programación gráfica de la expresión matemática correspondiente se es posible obtener el mismo resultado.

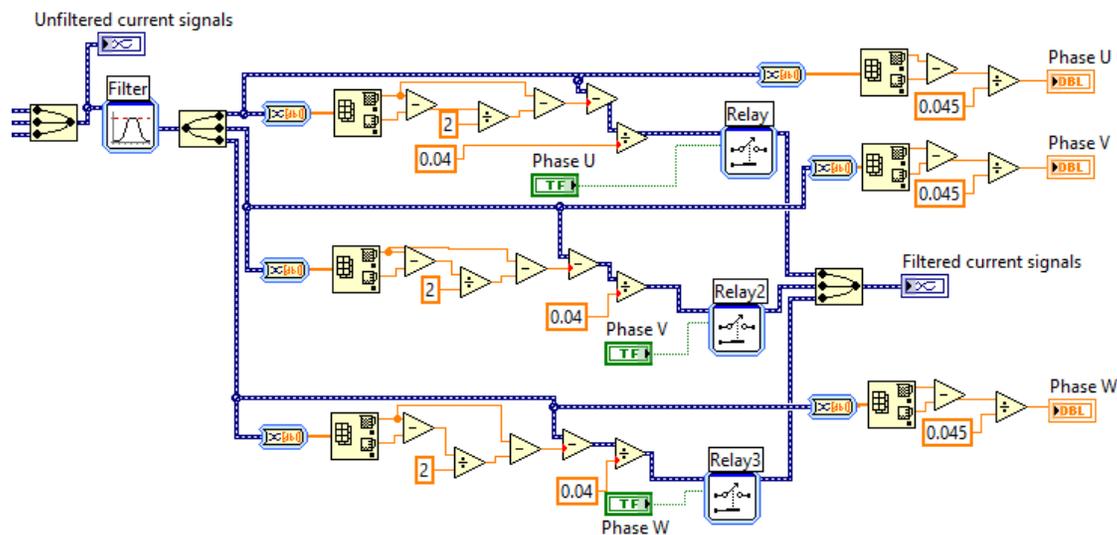


Figura 3 VI para el acondicionamiento y adquisición de corriente por fase.

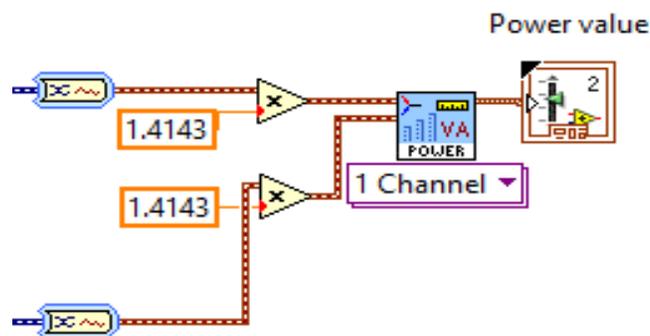


Figura 4 VI para el cálculo de la potencia por fase.

#### 4. Resultado técnico

En la figura 5 se muestra el panel frontal de la plataforma experimental propuesta, que consiste en:

- Monitor trifásico de voltaje, pico a pico con un selector de fase y un indicador numérico del valor RMS.
- Monitor trifásico de corriente pico a pico con un selector de fase y un indicador numérico del valor RMS.
- Monitoreo de la velocidad del rotor con un indicador numérico de RPM.

- Monitoreo de la potencia activa y reactiva con un control de activación y dos indicadores numéricos para valores de potencia RMS.
- Monitoreo del voltaje del bus CD con un indicador numérico del valor RMS.

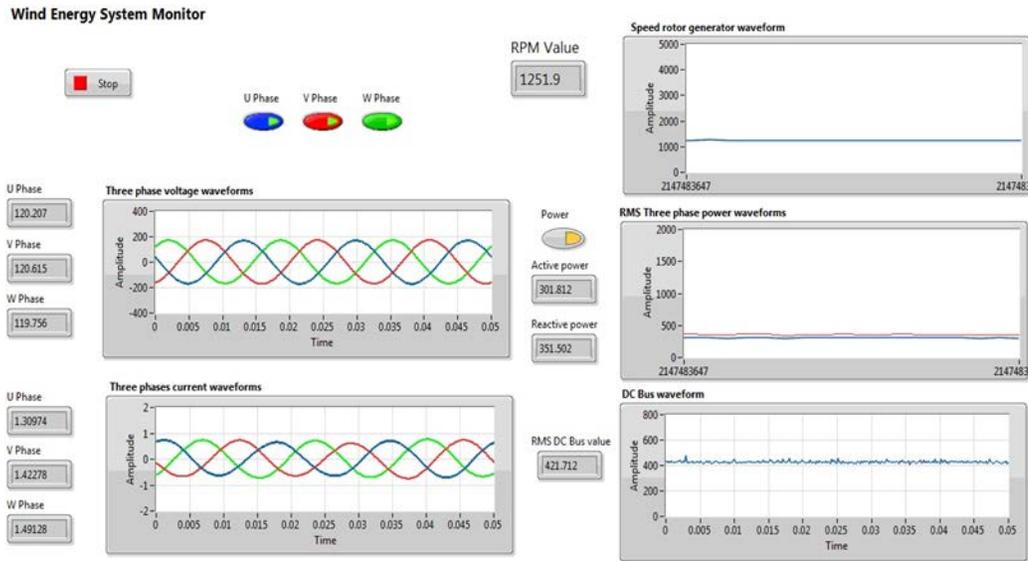


Figura 5 Panel frontal del monitor de sistema de energía eólica.

Las figuras 6 y 7 muestran las gráficas exportadas de las tres fases de voltaje y corriente, característica del sistema propuesto que permite el análisis de cada fase por separado, todo ello mediante un botón de activación lógica localizado en el panel.

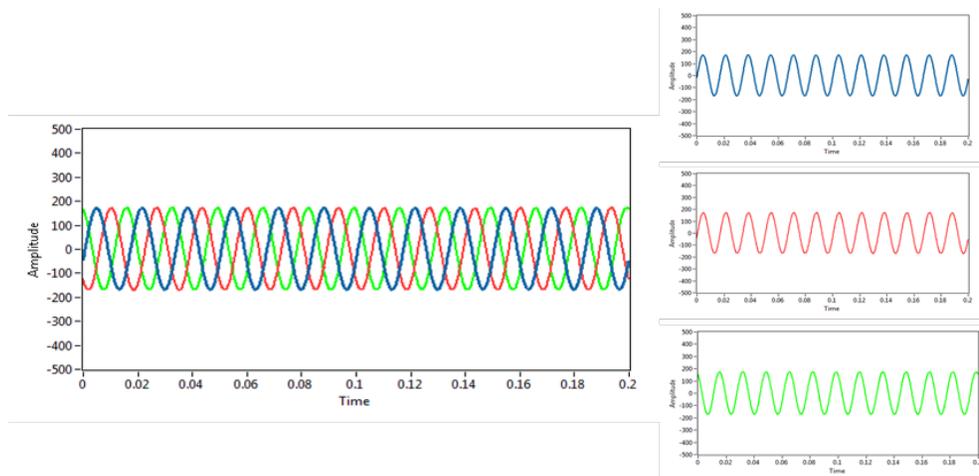


Figura 6 Exportación de voltajes trifásicos.

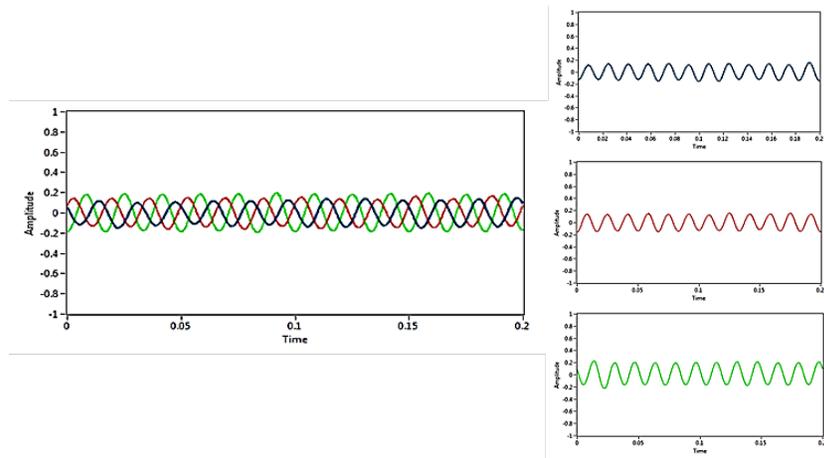


Figura 7 Exportación de corrientes trifásicas.

El encoder otorga 1024 pulsos por revolución que se utilizan para medir la velocidad de rotor, en la figura 8 se muestra el gráfico exportado del sistema monitor a 1251,9 rpm.

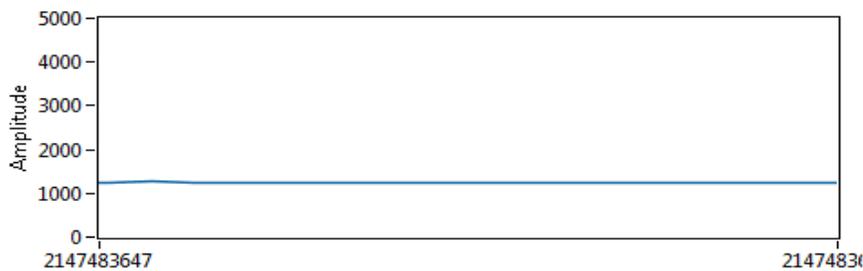


Figura 8 Velocidad del eje del rotor en RPM.

El voltaje y corriente trifásicos se utilizan para obtener la potencia activa y reactiva, la figura 9 muestra los gráficos exportados del sistema, con una potencia activa de 301,812 watts (línea azul) y una potencia reactiva de 351.01 VAR (línea roja).

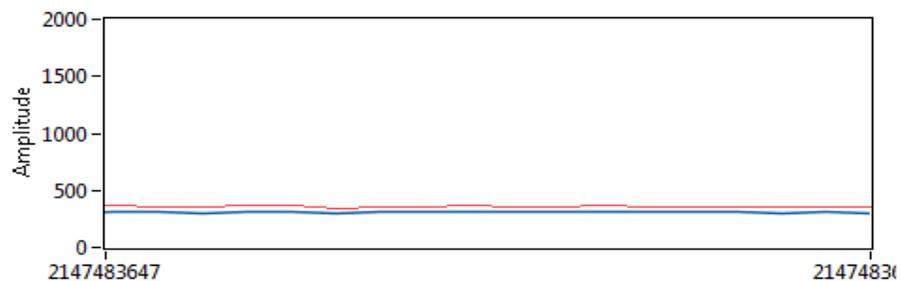


Figura 9 Potencia activa y reactiva.

Finalmente, la medición del bus de CD de un convertidor back to back, consiste en dos convertidores CD-CA conectados por un bus de CD, la figura 10 muestra el gráfico exportado del sistema de monitoreo con valor de 421.712 de VRMS.

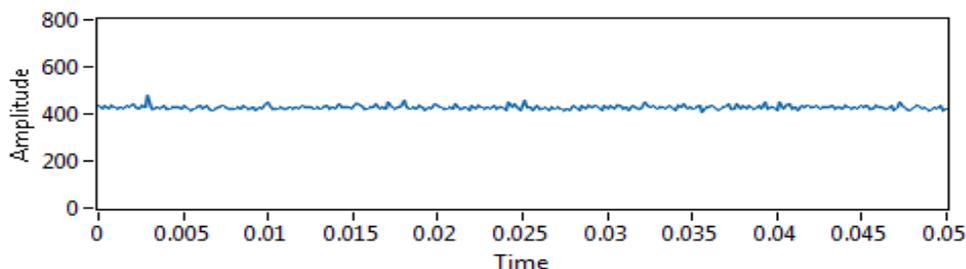


Figura 10 Medición del Bus de CD.

## 5. Resultados de la comparación de la estrategia educativa (LCM vs POPB)

Se aplicó una encuesta basada en la escala de Likert [12], con habilidades profesionales dieciséis a cincuenta a cuatro estudiantes para conocer el grado de acuerdo de la metodología POPB en comparación con el modelo de aprendizaje tradicional (LCM Lecture Centred Mode por sus siglas en inglés).

En la tabla 1 se presentan los resultados en porcentajes derivados de la percepción del estudiante sobre el LCM tradicional representados y ordenados en tres grupos de competencias (instrumentales, interpersonales y sistémicas), mientras tanto, tabla 2 muestra los resultados encuesta POPB.

Un desafío común a escala de Likert es la forma de presentación gráfica de resultados, las tablas 1 y 2 no facilitan la evaluación en la distribución de los subconjuntos de los estudiantes muestreados, para dar un mejor escenario de evaluación crítica para la investigación, se utilizan gráficos de barras divergentes para comparar el desarrollo de habilidades en ambos modelos educativos. Las tablas 3 y 4 muestran los resultados gráficos de la escala de Likert, los porcentajes de los encuestados que están de acuerdo con la declaración tienden hacia la derecha del cero, localizada en la mitad de la tasa de acuerdo "ninguna opinión", por el contrario, la respuestas en las que el estudiante está en desacuerdo tiende a la izquierda.

Tabla 1 Los resultados del estudio relacionado con LCM.

<i>Lecture Centred</i>	Total Count	Strongly Agree	Agree	No Opinion	Disagree	Strongly Disagree	Percentage Total
<b>All Survey Responses</b>	<b>864</b>	<b>5.32</b>	<b>21.3</b>	<b>41.67</b>	<b>24.77</b>	<b>6.95</b>	<b>100</b>
<b>Instrumental group</b>							
<b>Capacity for analysis and synthesis</b>	<b>378</b>	<b>3.7</b>	<b>25.9</b>	<b>44.4</b>	<b>18.5</b>	<b>7.4</b>	<b>100</b>
<b>Ability to organize and plan</b>		<b>0</b>	<b>14.8</b>	<b>59.26</b>	<b>25.9</b>	<b>0</b>	<b>100</b>
<b>Basic knowledge of mechatronics engineering</b>		<b>0</b>	<b>22.2</b>	<b>29.6</b>	<b>40.7</b>	<b>7.4</b>	<b>100</b>
<b>Oral and written communication</b>		<b>18.5</b>	<b>33.3</b>	<b>25.9</b>	<b>18.5</b>	<b>3.7</b>	<b>100</b>
<b>Ability to search and analyze information from various sources</b>		<b>11.1</b>	<b>11.1</b>	<b>51.85</b>	<b>14.8</b>	<b>11.1</b>	<b>100</b>
<b>Troubleshooting</b>		<b>0</b>	<b>33.3</b>	<b>40.7</b>	<b>25.9</b>	<b>0</b>	<b>100</b>
<b>Decision making</b>		<b>3.7</b>	<b>14.8</b>	<b>51.85</b>	<b>18.5</b>	<b>11.1</b>	<b>100</b>
<b>Interpersonal group</b>							
<b>Critical capacity</b>	<b>162</b>	<b>11.1</b>	<b>22.2</b>	<b>29.6</b>	<b>33.3</b>	<b>3.7</b>	<b>100</b>
<b>Teamwork</b>		<b>3.7</b>	<b>22.2</b>	<b>25.9</b>	<b>37</b>	<b>11.1</b>	<b>100</b>
<b>Professional ethics</b>		<b>11.1</b>	<b>33.3</b>	<b>33.3</b>	<b>18.5</b>	<b>3.7</b>	<b>100</b>
<b>Systemic group</b>							
<b>Ability to apply knowledge in practice</b>	<b>324</b>	<b>7.4</b>	<b>0</b>	<b>48.1</b>	<b>18.5</b>	<b>25.9</b>	<b>100</b>
<b>Ability to learn</b>		<b>3.7</b>	<b>18.5</b>	<b>59.26</b>	<b>14.8</b>	<b>3.7</b>	<b>100</b>
<b>Creativity</b>		<b>3.7</b>	<b>7.4</b>	<b>48.1</b>	<b>25.9</b>	<b>14.8</b>	<b>100</b>
<b>Innovation</b>		<b>0</b>	<b>18.5</b>	<b>25.9</b>	<b>51.85</b>	<b>3.7</b>	<b>100</b>
<b>Ability to work autonomously</b>		<b>3.7</b>	<b>25.9</b>	<b>44.4</b>	<b>22.2</b>	<b>3.7</b>	<b>100</b>
<b>Achieve objectives</b>		<b>3.7</b>	<b>37</b>	<b>48.1</b>	<b>11.1</b>	<b>0</b>	<b>100</b>

El análisis de los resultados gráficos de LCM denota un comportamiento centralizado en la no opinión, con índices más altos en: habilidad para buscar y analizar dentro del grupo instrumental, capacidad crítica para grupo interpersonal y capacidad para aplicar conocimientos en la práctica de grupo sistemático.

POPB, por el contrario, muestra una mejor tendencia en la mayoría de las habilidades, teniendo índices sobresalientes en: comunicación oral y escrita dentro del grupo instrumental, capacidad crítica para el interpersonal y capacidad para aplicar conocimientos en la práctica y habilidad para trabajar autónomamente dentro del grupo sistemático.

Tabla 2 Los resultados del estudio relacionado con POPB.

POPB	Total Count	Strongly Agree	Agree	No Opinion	Disagree	Strongly Disagree	Percente Total
<b>All Survey Responses</b>	864	40.5	41.4	13.4	3.93	0.69	100
<b>Instrumental group</b>							
Capacity for analysis and synthesis	378	22.2	55.55	18.5	3.7	0	100
Ability to organize and plan		37	40.74	18.5	3.7	0	100
Basic knowledge of mechatronics engineering		40.7	48.1	7.4	3.7	0	100
Oral and written communication		11.1	37	29.6	18.5	3.7	100
Ability to search and analyze information from various sources		55.55	25.9	18.5	0	0	100
Troubleshooting		48.1	22.2	25.9	3.7	0	100
Decision making		44.44	40.74	14.8	0	0	100
<b>Interpersonal group</b>							
Critical capacity	162	33.3	44.4	11.1	7.4	3.7	100
Teamwork		48.1	44.4	3.7	3.7	0	100
Professional ethics		29.6	44.4	25.9	0	0	100
<b>Systemic group</b>							
Ability to apply knowledge in practice	324	70.4	25.9	0	3.7	0	100
Ability to learn		44.4	51.85	3.7	0	0	100
Creativity		40.74	55.55	0	3.7	0	100
Innovation		51.85	29.6	14.8	3.7	0	100
Ability to work autonomously		29.6	48.1	11.1	7.4	3.7	100
Achieve objectives		40.74	48.1	11.1	0	0	100

Tabla 3 Resultados de la escala de calificación para el modelo centrado en el profesor.

Lecturer Centred	Strongly Disagree	Disagree	No Opinion	Agree	Strongly Agree
<b>All Survey Responses</b>	6.9	24.77	41.67	21.3	5.32
<b>Instrumental group</b>					
Capacity for analysis and synthesis					
Ability to organize and plan					
Basic knowledge of mechatronics engineering					
Oral and written communication					
Ability to search and analyze information from various sources					
Troubleshooting					
Decision making					
<b>Interpersonal group</b>					
Critical capacity					
Teamwork					
Professional ethics					
<b>Systemic group</b>					
Ability to apply knowledge in practice					
Ability to learn					
Creativity					
Innovation					
Ability to work autonomously					
Achieve objectives					

Tabla 4 Resultados de la escala de calificación para la metodología POPB.

POPB	Strongly Disagree	Disagree	No Opinion	Agree	Strongly Agree
All Survey Responses	0.69	3.93	13.4	41.4	40.5
<b>Instrumental group</b>					
Capacity for analysis and synthesis					
Ability to organize and plan					
Basic knowledge of mechatronics engineering					
Oral and written communication					
Ability to search and analyze information from various sources					
Troubleshooting					
Decision making					
<b>Interpersonal group</b>					
Critical capacity					
Teamwork					
Professional ethics					
<b>Systemic group</b>					
Ability to apply knowledge in practice					
Ability to learn					
Creativity					
Innovation					
Ability to work autonomously					
Achieve objectives					

## 6. Conclusiones

La metodología POPB demostró ser una alternativa valiosa para la planificación y ejecución así como una herramienta eficaz en el desarrollo de habilidades específicas en los estudiantes según el perfil del plan de estudios y graduación. Durante el proceso, la conclusión principal es que la clave de éxito POPB es definir de manera precisa el papel del profesor y el estudiante para obtener resultados deseables.

Los estudiantes no sólo obtienen prototipos aceptables, si no también fueron capaces de contextualizar y proponer alternativas a problemas técnicos tales como: proceso de conversión de energía relacionado con convertidores conmutados, comportamiento dinámico o transitorio, control de desacoplo de potencia activa y reactiva, etc., lo que aporta un plus en el proceso de comprensión

y análisis de sistemas de convertidor de energía eólica y en el proceso de formación integral del estudiante.

## **7. Bibliografía y Referencias**

- [1] M. Ezzat, M. Benbouzid, S. Muyeen, L. Harnfors. "Baja tensión paseo-a través de técnicas DFIG-Based aerogeneradores: informe Estado de la técnica y las tendencias de futuro", IEEE IECON 2013, Vienne, Austria, pp.7681-7686. < hal-00926249 >, noviembre de 2013.
- [2] Caída de J. J. Zhang, M. Cheng, Wang W., M. Zhang, "Condition Monitoring" y diagnóstico de fallas para sistema de conversión de energía eólica, las transacciones de la sociedad electrotécnica de China ", vol. 28, N° 4, pp. 261-272, abril de 2013.
- [3] Kandpal de C. de T. y L. Broman, "Educación de las energías renovables: una revisión de la situación mundial", renovable y sostenible de energía de revisiones, vol. 34, pp. 300-324, marzo de 2014.
- [4] E. Moesby, "Desarrollo del Currículum para el aprendizaje orientado a proyecto y basado en problemas (POPBL) con énfasis en habilidades personales y habilidades", J. mundial de ingeniería. Educ., vol. 9, núm. 2, págs. 121-128, 2005.
- [5] Ibrahim N., S. Abd.Halim, "Implementación de proyecto-orientado Problem-Based Learning (POPBL) en Introducción al curso de programación", Simposio Internacional de investigación sobre aprendizaje basado en problemas (IRSPBL), Kuala Lumpur, Malasia, 2013, págs. 279-288.
- [6] A. Kumar, S. Fernando, R.C. Panicker, "Basadas en proyectos de aprendizaje en la educación de sistemas embebidos utilizando una plataforma FPGA", IEEE trans. Educ., vol. 56, núm. 4, págs. 407-415, noviembre de 2013.
- [7] M. J. Duran, A. Pozo-Ruz, F. Guzmán, J. Fernández, Guzmán H., "Comprensión electrónica de potencia y máquinas eléctricas en el sistema de conversión de energía eólica multidisciplinar", IEEE trans. Educ., vol. 56, núm. 2, págs. 174-182, puede. 2013.

- [8] D. Santos Martín, J. Alonso-Martinez, J. Eloy-Garcia, S. Arnaltes, "basado en problemas aprendizaje en energía eólica usando configuraciones virtuales y reales", *IEEE trans. Educ.*, vol. 55, núm. 1, pp. 126-134, febrero de 2012.
- [9] J.R. Arribas, Veganzones C., F. Blázquez, C.A. Platero, D. Ramírez, S. Martínez, J.A. Sánchez, N. Herrero, "Simulación de computadora y sistema de banco de escala laboratorio para la enseñanza y la formación de ingenieros en el Control de la doble inducción de Fed de generadores de viento", *IEEE trans. Educ.*, vol. 26, núm. 3, pág. 1534-1543, de agosto de 2011.
- [10] Popa, L.M., Jensen, B. B. Ritchie, E., Boldea, I., "Condición de control de generadores eólicos", *Conferencia de aplicaciones de la industria*, vol. 3, págs. 1839-1846, 2003, DOI: 10.1109/IAS.2003.1257819.
- [11] «LabVIEW, Manual de usuario», National Instruments, Austin TX, abril de 2003.
- [12] Yusoff, R.; Janor, R.M., "Una escala métrica propuesta por expresar su opinión," *las estadísticas en ciencia, negocios y la ingeniería (ICSSBE)*, Conferencia Internacional 2012, 2012, páginas: 1-6, DOI: 10.1109/ICSSBE.2012.6396603

# **METODOLOGÍAS DE SOLUCIÓN DE DIVERSOS PROBLEMAS PRESENTADOS EN EL DISEÑO Y DESARROLLO DE UN CONTROLADOR TÉRMICO**

***Micael Gerardo Bravo Sánchez***

Instituto Tecnológico de Celaya

*gerardo.bravo@itcelaya.edu.mx*

***Julio Alberto Ramírez Montañez***

Instituto Tecnológico de Celaya

***Juan José Martínez Nolasco***

Instituto Tecnológico de Celaya

*juan.martinez@itcelaya.edu.mx*

## **Resumen**

En el presente trabajo se aborda la estrategia de solución a los diversos problemas que pueden acontecer en el desarrollo de controladores térmicos. Estos controladores están basados en el mismo principio de funcionamiento pero diseñados para elementos calefactores de diferentes características eléctricas. Los elementos de sensado seleccionados fueron termopares tipo J los cuales presentaban características de funcionamiento diferentes lo cual requirió de un acoplamiento distinto para ambos controladores. Tales diferencias tienen que ser tomadas en cuenta para el correcto funcionamiento del circuito final. Para lograr esto se seleccionaron los componentes apropiados y disponibles en el mercado. En conjunto con la aplicación de filtros para mejorar el acoplo de señales.

**Palabra(s) Clave(s):** control térmico, driver, LabVIEW, monitoreo.

## 1. Introducción

En la electrónica ningún componente es exactamente igual, esto es un factor importante a tener en cuenta en la construcción de un circuito electrónico. La mayoría de las veces estas diferencias no afectan el funcionamiento, pero en raras ocasiones la suma de los errores de los componentes que integran un circuito modifican el funcionamiento de este.

En esta investigación se estudiaron 2 drives de control térmico los cuales son implementados en dos situaciones distintas. La primera consiste en la destilación de mezclas binarias. Es un proceso por el cual se separan las sustancias de dicha mezcla en sus componentes originales. Un objetivo principal de este estudio es la generación de diagramas de fases [1]. El segundo estudio es la canalización de nanotubos, para dicha reacción es necesario tener una estabilidad en el control por un tiempo prolongado [6].

Los termopares al ser sensores electrónicos pueden funcionar de distintas maneras, debido a que se conforman de la unión de dos metales distintos, la sensibilidad puede variar dependiendo de cada termopar. Una de la forma usual de funcionamiento es al estar en contacto directo con una fuente de calor el termopar genera una diferencia de potencial, figura 1. La temperatura ambiente no generara el calor necesario para generar dicho diferencial. Otros termopares poseen una sensibilidad mayor. Debido a que son capaces de medir la temperatura ambiente sin la necesidad de estar en contacto directo con la fuente de calor.



Figura 1 Termopar tipo J (izquierda) y forma usual de sensar (derecha).

Las mantas calefactoras transforman energía eléctrica a térmica en una razón dependiendo de los materiales de las cuales estén elaboradas [3]. En esta investigación se empleó una manta térmica elaborada de una aleación de cromo-níquel recubierta por silicona y una manta térmica para matraz redondo recubierta de fibra de vidrio, figura 2.



a) Térmica 1.



b) Manta térmica 2.

Figura 2 Mantas empleadas.

En la tabla 1 se enlistan las características de las mantas térmicas utilizadas. Las cuáles serán importantes para identificar la potencia máxima que el circuito tendrá que soportar para maximizar el control y el uso de dicha manta térmica.

Tabla 1 Características de las mantas térmicas utilizadas.

	Manta 1	Manta 2
Potencia	130 W	400 W
Resistencia	864 $\Omega$	34 $\Omega$
Voltaje de alimentación	0 – 120 V	0 – 120 V
Otros datos	Longitud 30 cm por un ancho de 10 cm	Diseñada para un matraz tipo bola de 1 l

## 2. Desarrollo

El primer paso es determinar las diferentes características operativas de cada controlador. Puesto que si el objetivo del control térmico es distinto, es necesario especificar las particularidades de cada uno, tabla 2.

El control 1 será utilizado en un proceso de destilación de mezclas binarias a diferentes concentraciones para generar tablas de estados. El incremento de la temperatura será gradual con el fin de no generar agentes patógenos y determinar

con precisión el punto de separación de las sustancias puras [1]. En el segundo caso el controlador tiene que incrementar la temperatura lo más rápido posible y mantenerse constante durante un tiempo especificado por el usuario [6].

Tabla 2 Tabla de especificaciones para cada controlador.

	control 1	control 2
Tiempo de estabilidad	15 minutos	3 días
Rango de control	Temp. Ambiente – 97 °C	Temp. Ambiente 130 °C
Tipo de control	PID	ON - OFF
Error permisible	±0.1 °C	±5 °C
Voltaje de alimentación	120 VAC	120 VAC
Voltaje de conversión	0 – 120 VDC	0 – 120 VDC

El controlador PID es la mejor opción para el primer control al ir incrementando de forma graduar y constante la temperatura en un intervalo de tiempo de 45 minutos aproximadamente. La obtención de las ganancias utilizadas en dicho control se generó en el software Matlab después de capturar el comportamiento de calentamiento en lazo abierto.

El factor común de ambos controladores se basa en la conversión energética utilizando un circuito rectificador controlado de onda completa en conjunto con la manta térmica. El circuito rectificador transformara una señal de corriente alterna de 120 V AC con una frecuencia de 60 Hz a una señal variable de 0 a 120 V DC [2]; la conversión térmica esta dictaminada por las características de la manta usada en cada caso, figura 3.

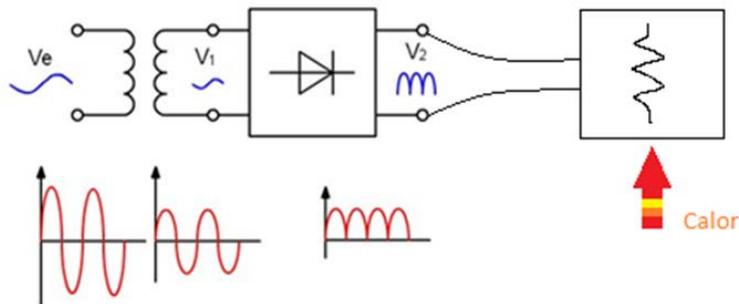


Figura 3 Conversión de AC - DC a energía térmica.

La segunda etapa crucial es la etapa de sensado, como se mencionó anteriormente se contaba con dos sensores con una sensibilidad distinta. En la figura 4 se observa el diagrama de control del control térmico.

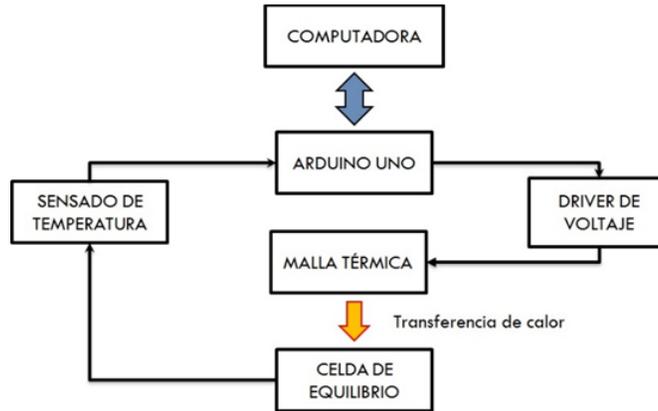


Figura 4 Etapas del control.

La etapa de acoplamiento del sensor seleccionado esta dictaminada por el circuito integrado que se utilizó en cada caso, uno fue el INA2126 y el segundo es el AD620. Ambos son amplificadores de instrumentación de ganancia ajustable mediante una resistencia denominada  $R_G$ . En la figura 5 se observa la configuración interna de ambos integrados.

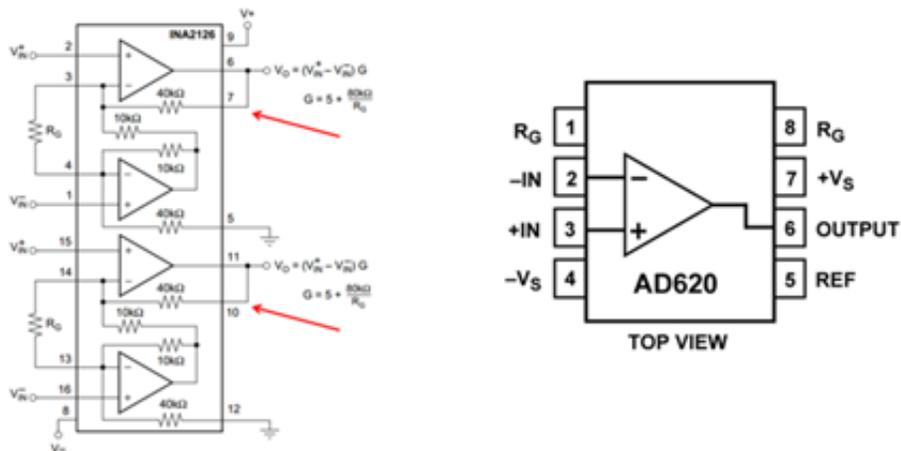


Figura 5 INA2126 izquierda y AD620 derecha.

Para calcular la ganancia del circuito INA2126 se describe en ecuación 1.

$$G = 5 + \frac{80 \text{ k}\Omega}{RG} \quad (1)$$

Mientras que para el circuito AD620 varia, y se describe en ecuación 2.

$$G = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{RG} + 1 \quad (2)$$

La ganancia se seccionada era aproximadamente de 10, con el objetivo de ser capaz de visualizar los incrementos de termopar.

El último factor es la potencia que el circuito tendrá que soportar para garantizar el correcto funcionamiento [4]. En el primer control la potencia máxima de los dispositivo fue de 6 A. En el caso del segundo controlador la potencia máxima es de 12 A. Son los valores comerciales capaces de maximizar la eficiencia de cada controlador.

### 3. Resultados

Los instrumentos virtuales de medición (VI) se programaron en el software LabVIEW con sus diferentes especificaciones. Los paneles frontales se muestran en figuras 6 y 7. Cada uno adaptado para las características de operación de cada controlador.

El primer panel frontal muestra el control térmico para el fenómeno de destilación. En este panel es posible monitorear el incremento gradual y el margen de error al mismo tiempo. De la misma manera es posible monitorear las variaciones del voltaje del control de calentamiento. Además cuenta con un control para definir la temperatura deseada.

En el segundo panel frontal se observan indicadores de control de tiempo dividió en días, horas, minutos y segundos, los cuales mostraran el tiempo restante referido al tiempo establecido al inicio del análisis en segundos. También se muestra una gráfica que representa el comportamiento del calentamiento. Estas diferencias se basan en la necesidad de definir un tiempo, una temperatura deseada y la opción de guardar los datos adquiridos durante el calentamiento.

La importancia de definir el tiempo de estabilidad radica en que el operario pueda definir dicho tiempo para adaptarse a diferentes canalizaciones.

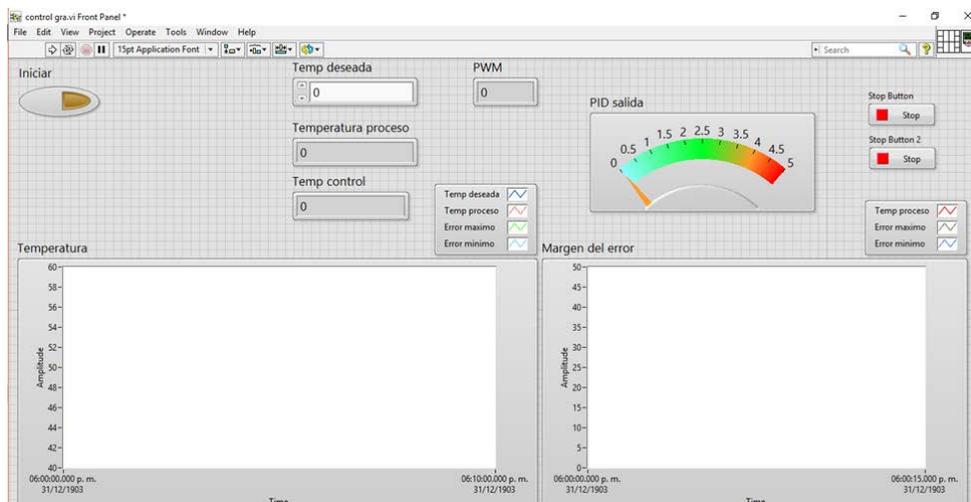


Figura 6 Control 1 utilizado en la destilación de mezclas binarias.

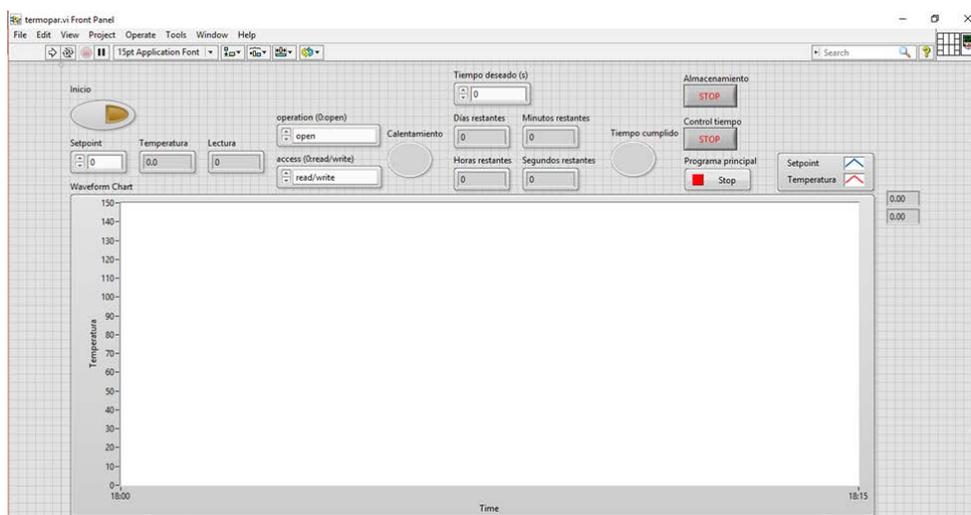


Figura 7 Control 2 utilizado para efectuar canalizaciones por tiempo definidos.

#### 4. Discusión

Definir las características de funcionamiento de un circuito es importante para definir la mejor estrategia de solución al problema a solucionar. Contar con una

mente abierta ayuda a no limitar el correcto funcionamiento de los componentes, si no se hace esto se generan más problemas que soluciones [5].

El hecho de hacer dos o más circuitos con el mismo principio de funcionamiento no garantiza que funcionen correctamente en diversos casos de estudio, cada uno se tendrá que adaptar a las condiciones importantes que restrinjan a cada análisis.

## **5. Conclusiones**

La familiarización con diversos componentes electrónicos existentes ayuda a disminuir los errores acumulados en la construcción de placas de potencia. Comercialmente existen diversas marcas y proveedores los cuales trabajan con diferentes estándares, tratando de ofrecer componentes lo más idénticos posibles. Esto indica que el error no siempre está en la conexión física también puede localizarse en el interior de algún componente electrónico. La solución podrá ser tan sencilla como agregar un filtro físico o adaptar la etapa de acoplamiento entre los componentes.

Diversas placas de control podrán trabajar bajo el mismo principio de operación, pero contarán con alguna adaptación para maximizar su eficiencia, esta puede ser una mayor potencia de trabajo, como en los casos de estudio analizados en este trabajo.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] C. A. Cardona, I. R. Navarro y L. G. Matallana. Medición del equilibrio líquido-vapor del sistema metanol-acetato de metilo a 580 mm hg experimental liquid vapour equilibrium of the binary system methanol-methyl acetate at 580 mm Hg. *Revista Colombiana de Química*, (2006). 35(1).
- [2] A. Larco Gómez, R. Sánchez Rosado & H. Espinoza Bravo. Rediseño y construcción del sistema eléctrico y electrónico de control de unidades educativas, tipo mawdsley's, para el estudio de convertidores ac/dc, ac/ac y control de motores dc y ac. (2011).
- [3] Mantas calefactoras. [www.elementoscalefactores.com/productos-es/mantas-calefactoras.htm](http://www.elementoscalefactores.com/productos-es/mantas-calefactoras.htm). Septiembre 2015

- [4] M. H Rashid, González, M. H. R. V., y P. A. S Fernández. (2004). *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Pearson Educación.
- [5] Rashid, M. H., González, M. H. R. V., & Fernández, P. A. S. (2004). *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Pearson Educación.
- [6] Huitle, L. M., & Alejandro, U. (2011). *Fabricación y purificación de nanotubos de carbono para el desarrollo y caracterización de conductores eléctricos transparentes (Doctoral dissertation)*.

# **SISTEMA EXPERTO DETERMINISTA PARA EL DIAGNÓSTICO DE ENFERMEDADES ERITEMATO-ESCAMOSAS EN PROLOG**

***Norma Verónica Ramírez Pérez***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*norma.ramirez@itcelaya.edu.mx*

***Gerardo Azuara Garcia***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*12030808@itcelaya.edu.mx*

***Francisco Javier Corona Rodriguez***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*12030904@itcelaya.edu.mx*

***Juana Rubi Ramirez Garcia***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*12030797@itcelaya.edu.mx*

***Humberto Sánchez Martínez***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*12030785@itcelaya.edu.mx*

## **Resumen**

Este artículo muestra cómo desarrollar un Sistema Experto Determinista para el diagnóstico de enfermedades eritemato-escamosas usando como referencia una base de datos del repositorio de UCI [1] llamada Dermatology Database. El Sistema Experto está programado en PROLOG [2]. Este software trabaja con predicados y permite que el sistema se base en reglas. El sistema experto pretende ser una herramienta para un médico en dermatología ya que las enfermedades

“Eritemato-Escamosas” son complicadas de diagnosticar y este sistema podría ser de facilidad para no someter al paciente a una biopsia que determine la enfermedad que tiene.

**Palabra(s) Clave(s):** biopsia, eritemato-escamosas, lógica borrosa, PROLOG, sistema experto.

## **1. Introducción**

En la actualidad el estudio de la dermatología es muy complicado específicamente en la rama de las enfermedades eritemato-escamosas ya que los síntomas que presentan estas enfermedades son comunes entre ellas por lo cual es muy difícil saber con certeza el tipo de enfermedad que se padece. Lo que diferencia una de otra es uno o dos síntomas.

Los sistemas expertos surgen de las técnicas de la inteligencia artificial (IA) que son objeto de amplias investigaciones desde el año 1950, pero la investigación con respecto a este campo comenzó en los años 60’s donde surgen los primeros artículos con respecto al tema. Los sistemas expertos utilizados en inteligencia artificial son software que emula el comportamiento de un experto humano en la solución de un problema. Los sistemas expertos funcionan de manera que almacenan conocimientos concretos para un campo determinado y solucionan los problemas, utilizando esos conocimientos, mediante deducción lógica de conclusiones. Con ellos se busca una mejora en calidad y rapidez de respuestas dando así lugar a una mejora de la productividad del experto.

Para la elaboración de este sistema experto se utilizó Prolog por ser un lenguaje de programación basado en los paradigmas de programación declarativa y funcional. Además de poder aprovechar el motor de inferencia de Swi-Prolog también ofrece una gran facilidad para trabajar con interfaces gráficas. En los siguientes apartados describiremos brevemente los conceptos más importantes acerca de los sistemas expertos, metodología, resultados y conclusión.

## 2. Conceptos

### Sistemas Basados en reglas

Los sistemas basados en reglas constituyen un campo de estudio importante dentro de la IA ya que nos ayuda a capturar la experiencia humana en la resolución de problemas, con el fin de alcanzar decisiones consistentes y repetibles. En ellos la representación del conocimiento se identifica por medio de la heurística o formas de proceder de los expertos. Son interesantes, especialmente en aquellos dominios en donde escasean los expertos como por ejemplo medicina, ingeniería, etc. ya que proporcionan un medio eficaz para difundir ampliamente razonamientos escasos y específicos.

Un sistema basado en reglas es un sistema que contiene los siguientes elementos una base de conocimiento(BC) con reglas y algún mecanismo de inferencia(MI) que selecciona las reglas que se pueden aplicar y las ejecuta, con el fin de obtener alguna conclusión (es decir, realizar un procesado o interpretación del conocimiento). El sistema también contiene una base de hechos (BH) o memoria de trabajo que acumula un conjunto de hechos establecidos, que se usan para determinar qué reglas puede aplicar el mecanismo de inferencias. Además, para que un sistema basado en reglas llegue a ser realmente útil debe de estar dotado de facilidades de entrada/salida sofisticadas, que facilitan el proceso de consulta y el desarrollo y refinamiento del sistema. Dichas facilidades se conocen como interfaz de usuario [3]. En la figura 1 se muestra cuáles son los elementos principales de un sistema experto basado en reglas.

### 3. Metodología

Para la realización de nuestro SE utilizamos la metodología de trabajo en cascada la cual se muestra en la figura 2.

Esta metodología nos fue muy útil debido a que nos permitió tener una mejor organización a la hora de realizar nuestro SE debido a que en primer lugar, tuvimos que analizar nuestra información del repositorio UCI, posteriormente empezar a idear como se iba a ver nuestra interfaz gráfica, iniciar la construcción del mismo,

realizar pruebas y posteriormente poder solucionar los problemas que se nos presentaron en la realización de pruebas.



Figura 1 Elementos de un sistema experto.

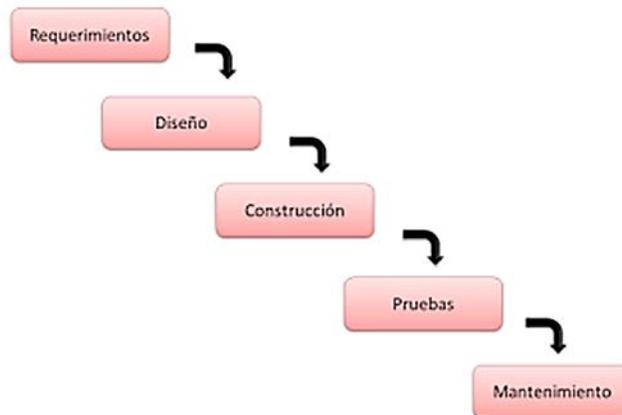


Figura 2 Metodología de trabajo en cascada.

### Fase 1: Estado del arte

Se realizó una investigación a fondo sobre los avances de la Inteligencia Artificial en el área de la dermatología, con lo cual saltaron a la vista muchos Sistemas Expertos enfocados al aprendizaje de los estudiantes, algunos se

especializan más en tratamientos o soluciones a problemas de la piel y otros más al diagnóstico de enfermedades.

A pesar de que ya existen muchos softwares en esta área, los sistemas expertos siguen siendo alentadores en estas áreas debido a la gran diversidad de enfermedades, tratamientos existentes, síntomas y rangos de edad, y como resultado surgen muchos sistemas que intentan resolver parte del problema, pero que no son la solución completa. Como resultado de esta fase obtuvimos un tema a tratar: “el diagnóstico de enfermedades cutáneas que son difíciles de determinar”.

## **Fase 2: Obtención del conocimiento**

Para obtener la información sobre las enfermedades cutáneas necesaria para construir el sistema acudimos a un repositorio UCI, el cual contiene bases de datos extensas, probadas, validadas por personas, investigadores y científicos reconocidos en sus diferentes áreas.

La base de datos que manejamos tienen como propietario al Doctor en Medicina y Filosofía Nilsel Ilter de la Escuela de Medicina de la Universidad de Gazi, Turquía y al Doctor en Filosofía H. Altay Guvenir del Departamento de Ingeniería Informática y Ciencias de la Información de la Universidad de Bilkent, Turquía.

En dicho conocimiento se sabe que son seis tipos de enfermedades: Psoriasis, Dermatitis Seborreica, Liquen plano, Pitiriasis Rosada, Dermatitis crónica y Pitiriasis Rubra Pilaris. La base presentaba 366 diagnósticos de enfermedades eritemato-escamosas concluyendo sus resultados en base a 34 características dentro de las cuales se encontraban los antecedentes familiares y el rango de edad de los pacientes; las demás características eran cuestiones clínicas e histopatológicas que se contestaban con rangos de 0 a 3, donde el cero era la ausencia y 3 era el grado más alto de presencia de determinado síntoma.

## **Fase 3: Representación del conocimiento**

Manejamos el conocimiento en frames o cuadros debido a que hacerlo con una red semántica resultaba muy complejo. Se tuvo además que ordenar la base de

datos por enfermedad, por antecedentes familiares y rango de edad para observar y detectar patrones en la información que nos ayudaron a deducir reglas de producción.

La base de datos presentaba grados de intensidad en la mayoría de los síntomas, por lo cual se estaba hablando de lógica borrosa, pero para hacer determinista nuestro sistema tomamos los números ceros como ausencia y los números del uno al tres, que representan las intensidades del síntoma, fueron tomados como presencia únicamente.

Con lo anterior encontramos síntomas fuertes, es decir, que siempre se presentan en determinadas enfermedades, así como síntomas ausentes y difusos, que son aquellos que a veces están y a veces no están en los diagnósticos de la misma enfermedad.

#### Fase 4: Creación de reglas

Las reglas que se introdujeron al sistema fueron deducidas de un análisis de síntomas fuertes y ausentes por enfermedad; un síntoma fuerte de una enfermedad no determina que el paciente padezca dicha enfermedad puesto que dicho síntoma puede ser un síntoma fuerte o difuso en otra enfermedad, tabla 1.

Tabla 1 Relación de reglas del sistema.

NÚMERO DE REGLAS	REGLAS
6	Síntomas principales por enfermedad
6	Síntomas ausentes por enfermedad
30	Unión de síntomas principales de 2 enfermedades distintas
60	Unión de síntomas principales de 3 enfermedades distintas
60	Unión de síntomas principales de 4 enfermedades distintas
30	Unión de síntomas principales de 5 enfermedades distintas
6	Unión de síntomas principales de 6 enfermedades distintas

Entonces el razonamiento aplicado fue hacer combinaciones de síntomas fuertes entre las diversas enfermedades, pero diagnosticando una enfermedad siempre y cuando se cumpla que no se presenten los síntomas ausentes de la enfermedad que se plantea como hipótesis, de tal modo que se descarten enfermedades cuyos síntomas que debieran ser ausentes se presentaron en el diagnóstico.

El lenguaje Prolog permite trabajar con un motor de inferencia, el cual consiste en evaluar las reglas de producción que permiten activar las reglas. Este lenguaje maneja el encadenamiento hacia adelante (modus ponendo ponens) y encadenamiento hacia atrás (modus tollendo tollens). La estrategia de razonamiento usada fue modus ponendo ponens, también conocida como afirmando afirma en la cual afirmando el antecedente de la regla se afirma el consecuente.

### Fase 5: Implementación

Prolog está dotado de herramientas para el trabajo con interfaces gráficas, por lo cual no se necesitó programar en otro lenguaje de programación; solo tuvimos que hacer uso de la librería XPCE para el manejo de ventanas, botones, cajas de texto y demás componentes gráficos.

En la figura 3 se muestra la pantalla principal del sistema, en la cual se muestran los nombres de los participantes del proyecto y las opciones de Iniciar o Salir.

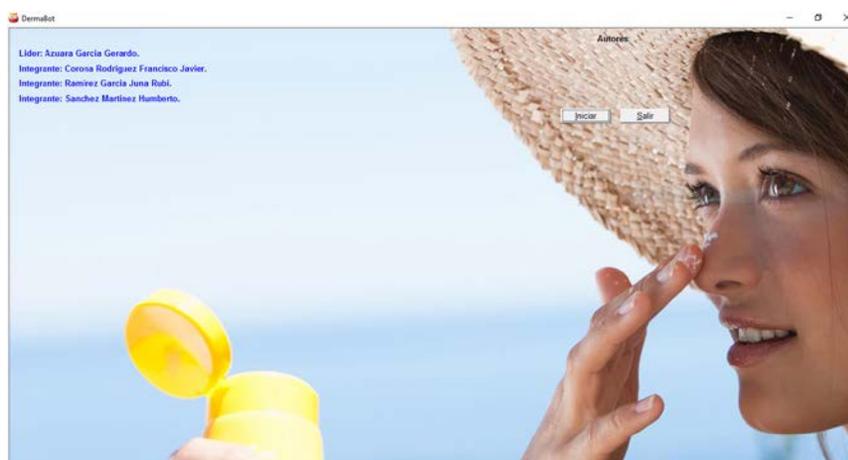


Figura 3 Interfaz de Inicio de DermaBot.

La figura 4 muestra una interfaz secundaria a modo de presentación en la cual se muestra el objetivo del proyecto, así como los objetivos específicos del mismo.



Figura 4 Interfaz secundaria de DermaBot.

La figura 5 es la pantalla de interacción principal con el especialista ya que en ella se plantean 33 preguntas inicializadas con un valor NO, dependiendo de la información suministrada, el Sistema Experto resuelve la cuestión con el botón de Evaluar.

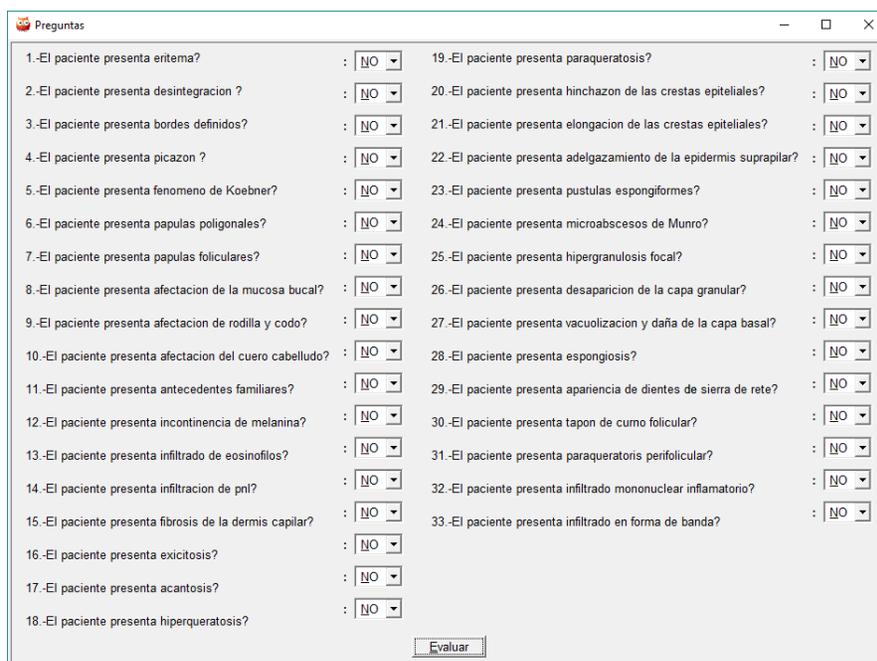


Figura 5 Cuestionario de síntomas.

Los diagnósticos que puede arrojar el sistema son siete, seis para enfermedades eritemato-escamosas y uno extra para cuando la información proporcionada al experto concluye con un diagnóstico imposible o tan escaso de hechos relevantes que no produzca un diagnóstico acertado, figuras 6 a 12.



Figura 6 Diagnóstico pobre o desconocido.



Figura 7 Diagnóstico de Psoriasis.



Figura 8 Diagnóstico de Dermatitis Seborreica.



Figura 9 Diagnóstico de Liquen Plano.



Figura 10 Diagnóstico de Pitiriasis Rosada.



Figura 11 Diagnóstico de Dermatitis Crónica.



Figura 12 Diagnóstico de Pityriasis rubra pilaris.

#### 4. Resultados

Como se mencionó en un principio, el conocimiento fue obtenido de una base de datos validada y probada por expertos en el área, científicos e investigadores a nivel internacional. Como nuestras reglas de producción están basadas en sus diagnósticos tuvimos que validar nuestras reglas con sus propios diagnósticos ingresando las diferentes combinaciones de síntomas y características.

Como resultado observamos una inferencia 90% aceptada ya que el Sistema Experto concluye siempre con la enfermedad diagnosticada de acuerdo a los síntomas del repositorio UCI, sin embargo, hay casos en los que la información suministrada no le es suficiente al software para llegar a una conclusión, especialmente en la psoriasis y el liquen plano que comparte 2 síntomas fuertes y la mayoría de sus síntomas ausentes.

Para llegar a la conclusión del 90% tomamos una muestra del 40% de cada enfermedad que nos proporcionó la base de datos, se ingresaban al sistema los síntomas y se registraba el resultado comparado con el diagnóstico del repositorio. El porcentaje de error que mostró nuestro sistema se debe al conjunto de síntomas difusos que no fueron considerados al momento de crear las reglas debido a su falta de determinismo en los diagnósticos, sin embargo, se pudieran identificar los casos de fallo y añadir reglas para su tratamiento y mejor resolución del caso.

## **5. Conclusión**

Se logró desarrollar un Sistema Experto Determinista a partir de información difusa almacenada en una base de datos, el cual que puede ser una herramienta de auxilio para estudiantes de dermatología y áreas relacionadas. Si bien el producto no cubre un 100% de fiabilidad, el 90% ofrecido en cuanto a la información proporcionada y teniendo en cuenta la defusificación de los datos es un logro satisfactorio y de gran alcance considerando que resolvemos un problema en la dermatología que se presenta muy frecuentemente y que generalmente conlleva a muchas complicaciones, gastos elevados y estudios repetitivos.

## **6. Referencias**

- [1] Base de datos de dermatología. Autor:Nilsel Ilter, M.D., Ph.D. Fecha de publicación:Enero de 1988. Fecha de consulta:24 de Junio del 2016 desde <https://archive.ics.uci.edu/ml/machine-learning-databases/dermatology/dermatology.data>
- [2] Swi-prolog Disponible en , <http://www.swi-prolog.org/>
- [3] Sistemas Basados en Reglas Capítulo 3, Autor: Maria Jesus Taboada Iglesias y Asuncion Gomez Perez. Fecha de consulta: 3 de Julio de 2016

# MÁQUINA RECUPERADORA DE CABLE PARA RECICLADORAS

## ***Gloria del Carmen Rendón Sustaita***

Instituto Tecnológico de San Luis Potosí  
*gloria\_rendon77@hotmail.com*

## ***José Ángel Domínguez López***

Instituto Tecnológico de San Luis Potosí  
*dominguez2373@hotmail.com*

## ***Hugo Martínez Apolo***

Instituto Tecnológico de San Luis Potosí  
*hugomtzapolo@hotmail.com*

## ***Cristian Gustavo Avella Reyna***

Instituto Tecnológico de San Luis Potosí  
*gustavo\_avellareyna@hotmail.com*

## ***Juan Carlos Avella Reyna***

Instituto Tecnológico de San Luis Potosí  
*juancarlos\_avellareyna@hotmail.com*

## ***David Alfredo Arenas Camos***

Instituto Tecnológico de San Luis Potosí  
*davidarenas9312@gmail.com*

## ***Juan Israel Dávila Barrón***

Instituto Tecnológico de San Luis Potosí  
*isra\_1023@hotmail.es*

## ***Ana Paula Guerrero Martínez***

Instituto Tecnológico de San Luis Potosí  
*correodeanapaula@hotmail.com*

## **Resumen**

En México, el reciclaje de la chatarra implica abarcar tanto el medio social como el medio natural. Los negocios dedicados al reciclaje de metales en nuestro país conllevan a la importante tendencia ecológica implicada en este tipo de práctica. Hoy en día son populares las tendencias relativas al cuidado del medio ambiente y quizás, en un futuro gracias a ellas, la sociedad se vuelva más responsable en su relación con nuestro planeta. En la actualidad existen personas y organizaciones que dedican su esfuerzo a proteger y difundir una cultura ecológica por medio de técnicas que han demostrado ser de las más eficientes: entre ellas destaca el reciclaje, que ha pasado de ser un esfuerzo por revertir los daños ambientales a convertirse un negocio sumamente rentable. Una de las actividades dentro del reciclaje de metales, es el proceso de separación del forro que envuelve el cable metálico. Se busca automatizar el proceso actual, para reducir tiempos y disminuir contaminación y accidentes, los cuales se presentan en estos momentos por ser un proceso manual y que puede generar contaminación requiriendo de al menos 5 trabajadores para llevarlo a cabo.

**Palabra(s) Clave(s):** cable metálico, chatarra, reciclaje de metales.

## **1. Introducción**

El reciclaje de los metales contribuye significativamente a no empeorar el entorno medioambiental actual. Al reciclar chatarra, se reduce significativamente la contaminación de agua, aire y los desechos de la minería en un 70 por ciento. Los cables eléctricos son un material muy valioso debido al precio al alza del kilo de cobre, pero se trata de un material difícil y costoso de recuperar de forma manual, haciendo que al final se pierda en el rechazo de planta [1]. En estos momentos de crisis económica, en los que resulta necesario optimizar todos los procesos y aprovechar al máximo todos los recursos, hay que tener en cuenta que es posible llevar a cabo este proceso de forma eficiente y viable económicamente gracias a la tecnología basada en sensores [2]. La incorporación de esta tecnología permite a las empresas dedicadas al reciclaje de la chatarra ser más competitivas y sobrevivir con éxito.

## **2. Desarrollo**

Actualmente en la mayoría de los negocios dedicados al reciclaje de metales no se cuenta con maquinaria para el proceso de pelado de cable de cobre y por lo tanto realizan el proceso de una manera manual y muy rudimentaria. Existen dos procesos para el retiro del forro, el primer proceso manual requiere de por lo menos cinco hombres, una persona corta el forro aislante del cable y los demás van jalando las grandes cantidades de cobre. A partir de este proceso manual surge la idea de crear una máquina peladora de cable, llamada Cooper Recycler y que con ella se pretende resolver el problema de lentitud y en algunos casos de contaminación, debido a que el segundo proceso para retiro del forro es el quemado del mismo, generando contaminación, la recuperación térmica de los cables de cobre consiste en la quema a la interperie de los recubrimientos de plástico de cables e hilos eléctricos, para recuperar cobre usado y otros componentes. Se trata de un proceso que requiere mano de obra, y suele ser una actividad ya sea individual o a pequeña escala, sin medidas para reducir las emisiones al aire [3]. Esta quema se suele realizar en bidones o directamente en el suelo. No se controla la temperatura ni se emplean medios de adicionar oxígeno para lograr la combustión completa de los compuestos de plástico.

La recuperación térmica del cableado de cobre se realiza sobre todo en nuestro país, ya que es una actividad de reciclaje de manera manual, tanto en la industria como de basura electrónica. Y a pesar de haberse aprobado leyes para prohibir esta quema a cielo abierto, esta práctica se sigue realizando.

En el estado de San Luis Potosí existen muchos negocios dedicados al reciclaje, en donde el pelado de cable les hace perder tiempo, es por ello que el proyecto es orientado a estos negocios.

Cooper Recycler es una máquina recuperadora de cable y es controlada por PLC, el cual manda la señal de arranque al motor trifásico que acciona los rodillos, éstos jalan el cable hacia las cuchillas que cortan el forro y así puede salir el cobre sin forro para su posterior reciclaje. Además, cuenta con sensores de seguridad que detienen al motor en caso de que el operador o algún elemento no deseado invadan el espacio de trabajo de la máquina.

La máquina reduce tiempos en el proceso de pelado de cable para reciclaje y a su vez, disminuye la cantidad de hombres necesarios para realizar la tarea, ya que solo se necesita de un operador que maneje la máquina y no de cinco hombres para obtener el producto terminado como se requiere actualmente en los dos procesos descrito anteriormente.

### 3. Resultados

Actualmente el proyecto se lleva a cabo en la empresa Compra y Venta de Chatarra Medina, ubicada en la Delegación de Villa de Pozos, en el municipio de San Luis Potosí. Cooper Recycler ha demostrado reducir el tiempo de recuperación de cable de acuerdo a la tabla 1 y, figuras 1 y 2.

Tabla 1 Resultado de proceso manual vs proceso automatizado.

TIEMPO REQUERIDO	PROCESO	
	MANUAL Considerando 6 trabajadores	AUTOMATIZADO Considerando una máquina con un solo calibre
1 segundo	0.11 m	1 m
1 minuto	6.6 m	60 m
1 hora	400 m	3600 m
2 horas	800 m	7200 m



Figura 1 Instalación de Cooper Recycler en la empresa.



Figura 2 Componentes base de Cooper Recycler.

## Proceso

El proceso que lleva a cabo Cooper Recycler permite separar el alma metálica de un cable de su respectivo forro en cuatro etapas:

- **Etapa 1.** Entrada del cable a la máquina.
- **Etapa 2.** Proceso de separación:
  - a) Ajuste de cuchilla de acuerdo al calibre del cable. En la parte de ajuste se coloca el cable en el cartucho de su calibre, los rodillos se posicionan según sea el grosor del cable que se va a recuperar.
  - b) Corte por parte de la cuchilla. Durante el corte del forro, el cable pasa por las navajas las cuales solo están en contacto con el forro para no dañar de ninguna forma el alma metálica.
  - c) Jalado del cable una vez cortado el forro. En la sesión de jalado los rodillos permiten un torque continuo del cable para evitar que se pierda el corte del forro en el área de las navajas.
  - d) Separación del forro del cable. El proceso final de separación es para separar el forro del metal por medio de un diseño implementado en la parte posterior a los rodillos.
- **Etapa 3.** Recuperación del cable.
- **Etapa 4.** Recuperación del forro.

Los procesos de funcionamiento de la máquina se puede apreciar en la figura 3.

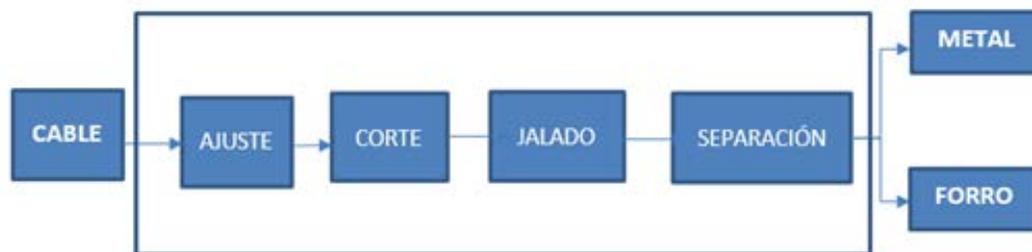


Figura 3 Proceso de separación.

### Componentes de la Cooper Recycler

- ❖ 1 motor trifásico de  $\frac{3}{4}$  hp
- ❖ 1 reductor sin fin corona
- ❖ 1 cadena para transmitir el movimiento
- ❖ 1 juego de rodillos
- ❖ 1 separador de forro
- ❖ 1 porta-navajas ajustable
- ❖ 1 juego de navajas
- ❖ Cartuchos para diferentes medidas de cable
- ❖ 1 PLC
- ❖ 1 botonera de control

Todos estos elementos están sentados en una base diseñada para soporte ordenado y ergonómico de los mismos, figura 4.

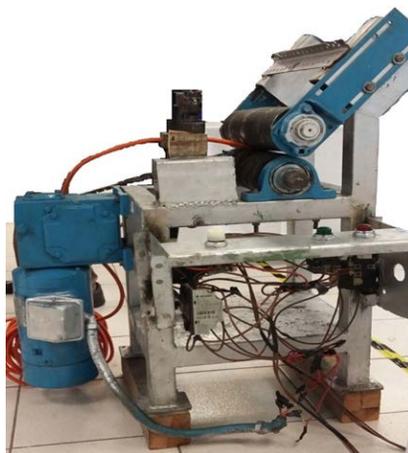


Figura 4 Cooper Recycler.

## **4. Conclusiones**

El proyecto ha tenido un desarrollo desde hace 8 meses, comenzando con un prototipo y análisis del problema mediante los procesos actuales para la recuperación de cable de cobre en las chatarrerías del Estado de San Luis Potosí. El proyecto fue avanzando hasta el desarrollo de una máquina recuperadora de cable a través de cuchillas, presentándose en diferentes ámbitos, uno de los cuales fue ENEIT 2016 en la ciudad de San Luis Potosí. Cooper Recycler reduce tiempo empleado en la recuperación de cable de cobre, eliminando la contaminación generada por el proceso manual, así como el reducir el tiempo en mano de obra, beneficiando al medio ambiente y mejorar los procesos de reciclaje en la empresa Compra y Venta de Chatarra Medina, ubicada en la Delegación de Villa de Pozos, en el municipio de San Luis Potosí.

## **5. Referencias**

- [1] Sobre el reciclaje de la chatarra: alcances sociales y ecológicos. <http://www.mecomsa.com.mx/sobre-el-reciclaje-de-la-chatarra-alcances-sociales-y-ecologicos/>. Mayo, 2016.
- [2] Recuperación de cables: caso práctico Titech. <http://www.interempresas.net/Reciclaje/Articulos/99769-Recuperacion-de-cables-caso-practico-Titech.html>. Mayo, 2016.
- [3] Categoría de fuentes (1) de la Parte III: Recuperación del cobre de cables por combustión lenta. [http://chm.pops.int/Portals/0/Repository/batbep\\_guidelines/UNEP-POPS-BATBEP-GUIDE-08-SP-17.Spanish.PDF](http://chm.pops.int/Portals/0/Repository/batbep_guidelines/UNEP-POPS-BATBEP-GUIDE-08-SP-17.Spanish.PDF). Mayo, 2016.

# REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DEL EFECTO DE PROCESOS DE FABRICACIÓN SOBRE ESFUERZOS EN COMPONENTES DE ALUMINIO

***Sara Inés Reséndiz Juárez***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*ines.resendiz.03@gmail.com*

***Ramón Rodríguez Castro***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*ramon.rodriguez@itcelaya.edu.mx*

***Erik López Vargas***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*erik.lopez@itcelaya.edu.mx*

***Oscar Fernando Valdés García***

Kolbenschmidt de México  
*oscarFernando.Valdes@mx.kspg.com*

***Luís Alejandro Alcaraz Caracheo***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*alejandro.alcaraz@itcelaya.edu.mx*

## **Resumen**

Conocer el efecto de los parámetros de maquinado y soldadura sobre los esfuerzos residuales en diferentes componentes de aleaciones de aluminio, realizando una revisión de la literatura de las técnicas de evaluación de los esfuerzos residuales reportadas en artículos científicos y tesis de posgrado. Con el fin de seleccionar una de estas técnicas para evaluar los esfuerzos residuales en un pistón automotriz de aleación de aluminio-silicio.

**Palabra(s) Clave(s):** agujero ciego, esfuerzos residuales, indentación colineal, método de elementos finitos (MEF), rayos-X.

## **1. Introducción**

Los esfuerzos residuales son definidos como fuerzas internas que se encuentran presentes en un material, son esfuerzos de tensión y compresión en estado de equilibrio sin la aplicación de fuerzas externas [1].

Los esfuerzos residuales, en su mayoría, aparecen en los procesos de manufactura, como fundición, rectificado, soldadura, doblado, mecanizado, forja de barras, tratamientos térmicos etc. [2], estos procesos transforman el material así como sus propiedades. También los esfuerzos residuales pueden aparecer en el material cuando este se encuentra en funcionamiento y llega a ser reparado o alterado [3].

Las exigencias que día con día se generan por parte de los consumidores en la industria automotriz, desencadena un mayor reto en este sector, ya que con ello la demanda de cada uno de los componentes automotrices debe cumplir con altos estándares de calidad, producidos en menor tiempo [4] y sobre todo garantizar la seguridad de cada componente. Los procesos de manufactura de estos elementos son operaciones claves para cumplir con los requisitos antes mencionados, siendo el proceso de maquinado en principal estudiado en esta investigación. El avance en la tecnología de dicho proceso ha ido evolucionando, donde se ha aumentado la velocidad de maquinado, se disminuyen los tiempos de trabajo y se mejora el acabado del material [4].

La importancia del proceso del maquinado en la fabricación de los componentes automotrices radica en la generación de esfuerzos residuales, los cuales podrían afectar de manera positiva o negativa dichos componentes, dependiendo también de los parámetros de mecanizado principalmente la velocidad de corte, la profundidad de corte y el avance.

El estudio de los esfuerzos residuales se debe principalmente que estos afectan de manera significativa las propiedades mecánicas del material [5], dureza, tensión, tenacidad a la fractura, resistencia etc. afectando la integridad del elemento así como su desempeño.

Las condiciones que presentan los materiales en estudio, como lo son sus dimensiones, su peso, el material con el cual fue elaborado, las velocidades de

ensayo requeridas, los costos que genera el ensayo, el equipo con el que se cuenta y si el ensayo puede ser destructivo o no [5], son puntos de partida para nuevas investigaciones, y el desarrollo de nueva tecnología al igual que nuevas técnicas de análisis.

## **2. Principales técnicas de evaluación**

### **Rayos X**

La técnica de los Rayos- X se basa en la medición de los macro y micro esfuerzos, siendo una técnica no destructiva [5]. Esto se logra cuando la muestra en estudio es colocada en un difractómetro y entra en contacto con Rayos-X, los cuales a su vez tienen efecto sobre la red cristalina del material y como consecuencia se presenta variación en la difracción [6].

Esta metodología fue realizada en [6] para obtener las tensiones residuales en un componente de acero el cual fue mecanizado bajo la operación de torneado y rectificado. Los estudios arrojan un comportamiento de tracción en la parte superficial del material por parte del torneado y a compresión por el rectificado, en cambio las tensiones internas muestran una ligera tracción por el rectificado y compresión por el proceso de torneado.

En [7] los materiales en estudio son aceros inoxidables y aceros de herramientas, ambos sometidos a torneado o rectificado, se logra determinar que el comportamiento al interior del material son tensiones con mayor compresión en el torneado comparadas a las producidas por la operación de rectificado.

En [8] se realiza un estudio del maquinado de cuatro coronas escalonadas y concéntricas por ambas caras, en la cual para su fabricación se emplearon herramientas de corte nuevas y herramientas de corte en su fin de vida, además de la variación de los parámetros de velocidad de corte, avance y profundidad.

### **Indentas colineales**

Otro de los métodos empleados en [9] es la técnica de las indentas colineales, la cual está basada en la medición de la distancia entre indentas colineales antes y después de la introducción de un tratamiento térmico. Para esta investigación se

realizaron ensayos de fresado frontal en aleaciones de aluminio, modificando los parámetros de velocidad de corte en un orden de magnitud. Concluyendo que dicha técnica puede determinar tensiones residuales pequeñas y que el cambio de la velocidad de corte no modifica substancialmente las distribuciones de tensiones residuales en los ensayos.

En [10] se llevó a cabo el fresado de una aleación de aluminio a velocidades altas, medias y bajas. El estudio de los esfuerzos residuales fue bajo la técnica de la micro-indentas, donde se concluyó que en las zonas de corte, prevalecen las componentes normales a compresión. En cambio se realizó por parte de [11] el estudio del fresado a altas velocidades de aleaciones de aluminio, los resultados de las tensiones obtenidas muestran influencia de las componentes ortogonales de la velocidad de corte.

La evaluación por este método también se realizó en [12] en dos probetas compuestas de aleaciones de aluminio mecanizadas a altas velocidades, resultando diferente sus estados de tensión residual resultantes, además se obtuvieron correlaciones entre las tensiones normales y la profundidad de corte.

El proceso de fabricación de una aleación de acero, durante el proceso de laminación también fue analizada bajo este método en [13], los resultados obtenidos de las tensiones normales fueron mayores que las tangenciales, además de presentarse a compresión.

## **El método de elementos finitos**

El avance en la tecnología ha permitido desarrollar modelos para la evaluación de las tensiones residuales, en [14] se hace mención de que algunos de estos programas aun cuentan con algunas limitantes como parámetros de entrada y validación. Sin embargo se muestran como nuevas alternativas comparadas a las metodologías convencionales antes mencionadas debido a su accesibilidad en cuanto al costo y a los tiempos de evaluación.

Uno de estos ejemplos es mostrado en [1], donde a través de este método y con ayuda del software ANSYS se evalúa un cilindro sometido a presión interna, donde se pudo determinar que los esfuerzos residuales daban paso a deformaciones

dentro de los elementos mecánicos excediendo su límite de cedencia. Las investigaciones realizadas por [14] también se hace uso del modelo de elemento finito para un elemento torneado proveniente de una aleación de titanio, desarrollando un modelo de predicción con el software DEFORM 3D.

Por su parte [15] realizó el análisis de tensiones residuales en una estructura de un autobús, realizando mediante perforaciones la liberación de tensiones, calculando los esfuerzos residuales tanto analítica como experimentalmente y comparando los resultados con una simulación mediante el software ANSYS.

### **Método del agujero ciego**

El método del agujero ciego es empleado en [17], donde se analiza una probeta de fatiga compuesta de aleación base níquel, cuadros de bicicleta y uniones circunferenciales entre tubos, siendo todos materiales en servicio.

Los esfuerzos ejercidos por soldadura por fricción, y soldadura mediante arco eléctrico son estudiados en [12], donde se comparan estas técnicas resultando que la soldadura por fricción tienen un contenido menor de esfuerzos residuales que la soldadura por arco eléctrico.

Otro caso de estudio es presentado por [18] donde describe el uso del método del agujero ciego para determinar los esfuerzos que la soldadura helicoidal ejerce en tubos de acero, se determina que los esfuerzos a compresión encontrados en el tubo le ayudan en las condiciones de trabajo.

### **3. Comparación y selección de metodología**

Para poder seleccionar una de las metodologías descritas anteriormente, se debe realizar una evaluación, esto se logra con una suma ponderada de cada uno de los criterios de selección, donde cada criterio es tomado como referencia para ser comparado con los otros, se le otorga una calificación donde el número 9 representa un alto valor de referencia, seguido del número 6 mostrando un medio valor de referencia, por último el número 3 para valores bajos. A continuación se muestra la tabla 1, donde se realiza la evaluación de las alternativas, mostrándose

el peso que recibe el criterio de selección, la calificación asignada (Calif) y la evaluación ponderada (Ev.pond).

Tabla 1 Evaluación de las alternativas.

Criterios de selección	Rayos-X		Indentación Colineal		Método de elemento finito(MEF)		Agujero ciego		
	Peso	Calif	Ev.pond	Calif	Ev.pond	Calif	Ev.pond	Calif	Ev.pond
Económico	25%	3	75	6	150	3	75	9	225
Facilidad	10%	3	30	9	90	3	30	6	60
Portátil	5%	6	30	3	15	3	15	9	45
Precisión	30%	6	180	3	90	3	90	9	270
Ambiente controlado	10%	3	30	6	60	9	90	9	90
Amplio rango de materiales	20%	3	60	6	120	9	180	9	180
<b>Total</b>			<b>405</b>		<b>525</b>		<b>480</b>		<b>870</b>
<b>Lugar</b>			<b>4</b>		<b>2</b>		<b>3</b>		<b>1</b>

Debido a los resultados que la evaluación arroja, se ha elegido el método del agujero ciego como el método más conveniente para la evaluación de los esfuerzos del pistón, ya que puede ser aplicado en campo con ayuda de un equipo portátil, se pueden evaluar un amplio rango de materiales, es un método sencillo, preciso y económico, y no se necesita trabajar en un ambiente controlado.

#### 4. Método del agujero ciego

El método del agujero ciego tiene sus inicios en el año de 1930 por Mathar, el cual apoyándose con extensómetros mecánicos midió los desplazamientos que se generaron alrededor de un orificio circular perforado en una placa estresada [19]. Seguido de Soete y Vancrombrugge en el año de 1950, donde se encargaron de perfeccionar la técnica de medición de las galgas extensiométricas [20].

Por su parte Kelsey realizó investigaciones y publicó la variación de esfuerzos residuales con la profundidad usando el método de “hole drilling” en el año de 1956.

Surgiendo Rendler y Vigness en el año de 1966 con una nueva aplicación del método “hole drilling” para determinar los esfuerzos residuales, donde se menciona una metodología más sencilla y también proponen las dimensiones de las galgas extensiométricas [20]. En el año 2002 la ASTM define la normativa ASTM E-837 donde se establecen todas las indicaciones para cumplir con este método [18].

El método del agujero ciego consiste en medir los esfuerzos de relajación de las tensiones cuando la pieza ha sido perforada a través de sensores llamados “galgas extensiométricas”, siendo el método clasificado como semidestructivo porque el área perforada de la pieza es pequeña, mencionado en [5] que en su mayoría dicha área no afecta el funcionamiento de la pieza.

## **5. Descripción de la metodología**

La metodología empleada para el análisis mediante el agujero ciego es la siguiente:

- Se limpia y se lija perfectamente el material para eliminar residuos de grasas, polvo y todo tipo de agente que pudiera interferir tanto en la medición de los esfuerzos como en el pegado de la galga extensiométrica.
- Se realiza el pegado de la galga extensiométrica en el área donde se interesa conocer el esfuerzo residual.
- Se conectan las galgas a un indicador de deformación estática a través de una unidad de alimentación y balance [3].
- Se colocan en cero los indicadores de las galgas extensiométricas y se taladra un pequeño agujero en el centro de las galgas, este paso se logra con ayuda de una perforadora de precisión (figura 1), el agujero se realiza a una profundidad aproximadamente igual al diámetro del taladro [5].
- Se realizan las mediciones correspondientes después del corte y se calculan las tensiones residuales con ayuda de las mediciones tomadas antes del corte.



Figura 1 Perforado de precisión Modelo RS 200 (Fotografía: Fernando Soria).

## 6. Conclusiones

Todas las metodologías descritas en estas investigaciones son buenas alternativas para determinar los esfuerzos residuales, sin embargo es de suma importancia elegir la metodología más conveniente, aquella que se adapte a todas las condiciones y características que el material en estudio presenta, para poder obtener resultados satisfactorios y confiables.

Para este caso en particular, y con ayuda de una evaluación ponderada, la metodología del agujero ciego fue la alternativa seleccionada, la cual se ajusta a las características que el material presenta. Con ello se pretende llevar a cabo la evaluación del pistón de aleación de aluminio bajo esta metodología, y con ello poder determinar los efectos de los parámetros de corte sobre el desempeño mecánico del pistón.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] C. D. Reséndiz Calderón. Evaluación del campo de esfuerzos residuales en cilindros sometidos a presión interna, aplicando el método de elemento finito, tesis de posgrado. 2011. Instituto politécnico nacional.
- [2] V, Ramos Gordillo. Análisis mediante simulación del efecto de las reparaciones en las tensiones residuales de soldeo. Tesis de licenciatura. 2013. Universidad politécnica de Cartagena.
- [3] J.A, Porro González. Optimización de campos de tensiones residuales en procesos de tratamiento superficial de materiales metálicos mediante ondas

- de choque generadas por láser. Tesis doctoral. 2010. Universidad politécnica de Madrid.
- [4] Y, Zamora Hernández. Y, Morales Tamayo. M, Lastre Aleaga. R, Beltrán Reyna. "Influencia de los recubrimientos de corte en el desgaste del flanco de insertos recubiertos durante el torneado del acero AISI 316L". Enfoque UTE, Volumen 6. Número 1. 2015. Páginas 13-24.
- [5] M. Monsalve. M. E, López. F. Vargas Galvis. "Técnicas utilizadas para la medición de esfuerzos residuales en películas delgadas depositadas por PVD". *Scientia et Technica*, Volumen 1. Número 36. 2007.
- [6] V. García Navas. I. Ferreres. J.A, Marañón. C. García Rosales. J. Gil Sevillano. "Tensiones residuales generadas en acero F-522 por distintos tipos de mecanizado". *Revista de metalurgia*. Volumen 41. Número 4. Páginas 266-279.
- [7] V. García. N. Ordas. M. L, Penalva. J. Fernández. K. Ostolaza. C. García Rosales K., García-Rosales. "Estudio mediante difracción de Rayos-X de las tensiones residuales generadas por diferentes tipos de mecanizado". *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, Volumen 43. Número 2. Páginas 251-254.
- [8] J. Díaz Álvarez. Análisis numérico y experimental del desgaste de herramienta e integridad superficial en los procesos de torneado de inconel 718. Tesis doctoral. 2013. Universidad Carlos III de Madrid.
- [9] F. V. Díaz. R. E. Bolmaro. E. F. Girini. H. Bianchini. "Determinación de tensiones residuales inducidas por maquinado". *Anales SAM/CONAMET*, 2007 Páginas 1581-1586.
- [10] F.V. Díaz. C.A. Mammana. A.P.M. Guidobono. "Evaluación de tensiones residuales inducidas por fresado de baja, media y alta velocidad en muestras de aleación de aluminio AA 7076-T6". Congreso internacional de metalurgia y materiales SAM-CONAMET/IBEROMAT/MATERIA. 2014.
- [11] F.V. Díaz. R.E. Bolmaro. C.A. Mammana. A. Guidobono. "Determinación de tensiones residuales inducidas por maquinado de alta velocidad usando un método de pares de indentas". CONAMET/SAM. 2008.

- [12] C. A. Mammana, F. V. Díaz. A. P. M. Guidobono. "Evaluación de Tensiones Residuales en muestras de aleaciones de aluminio mecanizadas a alta velocidad." X CONAMET/SAM.2010.
- [13] F. N. Rosso. A. C. Walker. "Estudio de Tensiones Residuales en Muestra de Aleacion de Aluminio Aa 6082-T6 en Estado de Suministro". Jornada de investigadores tecnólogos. 2013.
- [14] I. Izeta Lizarralde. P. J. Arrazo Arriola. J. C. Outeiro. "Modelización y validación de las tensiones residuales inducidas por aleaciones de aeronáutica". Asociación española de ingeniería mecánica. 2012
- [15] V. Díaz. J. L. San Román. E. Olmeda. A. Gauchia. "determinación experimental de tensiones residuales en un autobús urbano". 2007.
- [16] I. Hernández Arriaga. J. Pérez Meneses. E. Aguilera Gómez. "Determinación de esfuerzos residuales en una estructura tipo I producidos por soldadura". Memorias del XIX congreso internacional anual de la SOMIM. 2013. Páginas 1022- 1032.
- [17] A. M. Irisarri. "Efecto de las tensiones residuales sobre las prestaciones de diversos componentes". In Anales de Mecánica de la Fractura. Volumen 23. 2006. Páginas 245-50.
- [18] G. Juárez Luna. A. G. Ayala Milian. M. Niño Lázaro. "determinación experimental de esfuerzos residuales en tubos de acero con soldadura helicoidal". Sociedad mexicana de ingeniería estructural. 2004.
- [19] I. MEJÍA. C. Maldonado. A. Belladona. Ch. J. García. "Esfuerzos residuales generados en la soldadura de placas de acero inoxidable AISI 304 mediante el proceso SMAW". CONAMET/SAM. Volumen 2006. 2006, paginas. 1-7.
- [20] I. Velázquez Pérez. H. Plascencia Mora. "Medición de esfuerzos residuales por ruido de barkhausen y por barreno ciego". Verano de la investigación científica. Volumen 1. Número 2. 2015. Páginas 1618-1622.

# CONTROL GLOBAL PD PARA SEGUIMIENTO DE POSICIÓN EN MOTORES A PASOS DE IMANES PERMANENTES

***Maximiliano Valencia Moctezuma***

Universidad Autónoma de Querétaro

*mavamo135@gmail.com*

***Fortino Mendoza Mondragón***

Universidad Autónoma de Querétaro

*fmendoza@uaq.mx*

***Víctor Manuel Hernández Guzmán***

Universidad Autónoma de Querétaro

*vmhg@uaq.mx*

## **Resumen**

El control del motor a pasos de imanes permanentes es un tema de bastante interés en la actualidad ya que es bastante utilizado en aplicaciones que requieren precisión y porque puede ser controlado a lazo abierto. Pero en algunas aplicaciones el desempeño del motor a lazo abierto no es suficiente, lo que ha motivado al diseño de controladores a lazo cerrado que consideren la dinámica no lineal completa del motor. En este artículo se presenta el diseño de un controlador para el seguimiento de posición en motores a pasos de imanes permanentes que acciona una carga dependiente de la posición, además se prueba la estabilidad global del sistema a lazo cerrado utilizando el método directo de Lyapunov y se presentan resultados en simulación del controlador.

**Palabra(s) Clave(s):** estabilidad de Lyapunov, imanes permanentes, motor a pasos, seguimiento de posición.

## 1. Introducción

Un motor bastante utilizado por la ventajas que presenta es el motor a pasos de imanes permanentes (en inglés, Permanent Magnet Stepper Motor, PMSM), éstas son que puede ser controlado a lazo abierto y con señales digitales, es capaz de entregar un elevado par en un tamaño reducido, error de posición no acumulativo, el rotor puede ser bloqueado repetidamente sin dañarlo, la ausencia de escobillas y la presencia de embobinados sólo en el estator por lo que requieren poco mantenimiento y además presentan mejores propiedades de disipación del calor [1, 2, 3].

Las desventajas del PMSM son que el ángulo de paso no se puede modificar y si se le aplica un alto par contrario al rotor se puede bloquear y perder pasos por lo que el control de posición a lazo abierto deja de ser preciso. Por esto en algunos casos se requiere utilizar el control a lazo cerrado, las desventajas son que el controlador se vuelve más complejo y se incrementa el costo del sistema al utilizar sensores.

Comúnmente la dinámica del PMSM es despreciada y sólo se utiliza en lazo abierto y con señales digitales, esto se debe principalmente que la dinámica del PMSM es no lineal y puede ser controlado con cierta precisión en lazo abierto, pero se tiene una eficiencia baja y los pasos que da el PMSM presentan un sobrepaso significativo [4]. En [5] se encuentra un modelo linealizado del PMSM utilizando el método de mínimos cuadrados con el cual se obtiene una buena aproximación. Un problema en el diseño de controladores basados en el modelo es que se requiere el conocimiento de los parámetros del motor, por esto hay trabajos en donde se presentan métodos para identificarlos [4, 6, 7, 8, 9]. Para evitar utilizar el uso de sensores algunos autores han presentado controladores en donde utilizan observadores [10-18].

También se han presentado esquemas similares al control de campo orientado utilizado en el motor síncrono de imanes permanentes [19, 20, 21, 22]. En [23] se presenta un controlador por modos deslizantes para el PMSM.

Sin embargo, en sistemas Euler Lagrange es importante considerar la dinámica completa del actuador ya que si no es considerada el sistema puede volverse inestable [24, 25].

En [26] se presenta un controlador PI para el control de velocidad y en [27] se presenta un controlador para regulación de posición que son cambios de tipo escalón y no seguimiento de trayectorias, estos trabajos consideran la dinámica completa del sistema y presentan pruebas de estabilidad. En [28] se presenta un controlador para seguimiento de posición y utiliza filtros pasa bajas para eliminar el ruido de las variables medidas que considera la dinámica completa del sistema y además presenta pruebas de estabilidad, pero existe una relación de atenuación entre el efecto de los filtros y el desempeño del seguimiento de corriente, y además no considera una carga acoplada al motor.

En este trabajo es presentado un controlador de seguimiento de posición para PMSM que tiene acoplado una carga que depende de la posición, como un péndulo. Se prueba la estabilidad global del sistema en lazo cerrado y convergencia a cero del error de posición desde cualquier condición inicial considerando la dinámica no lineal completa del motor. Se presentan pruebas de simulación en MATLAB/Simulink® para observar el desempeño del controlador.

En la sección 2 se presenta el modelo del PMSM utilizado, el controlador propuesto y la prueba de estabilidad del sistema en lazo cerrado. En la sección 3 se presentan los resultados de simulación del desempeño del controlador propuesto. En la sección 4 se hace una discusión sobre los resultados obtenidos en este trabajo. En la sección 5 se encuentra la conclusión donde se destacan algunos puntos importantes del trabajo y se plantea el trabajo futuro.

## 2. Desarrollo

### Modelo matemático del PMSM

Considere el modelo del PMSM bipolar con una carga que depende de la posición [1, 6], ecuación 1.

$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = -k_m I_a \sin(N_R \theta) + k_m I_b \cos(N_R \theta) - g(\theta) \quad (1)$$

$$L\dot{I}_a + RI_a - k_m\dot{\theta} \cos(N_R\theta) = V_a \quad (2)$$

$$L\dot{I}_b + RI_b + k_m\dot{\theta} \sin(N_R\theta) = V_b \quad (3)$$

Donde  $\theta$  es la posición del rotor,  $J$ ,  $b$ ,  $k_m$  y  $N_R$  son las constantes positivas de inercia del rotor, coeficiente de fricción viscosa, constante de par y número de dientes, respectivamente.  $V_a$  y  $V_b$  son los voltajes aplicados a las fases  $a$  y  $b$ .  $I_a$  y  $I_b$  son las corrientes eléctricas de las fases y  $L$  y  $R$  son constantes positivas representando las inductancia y resistencia.

## Resultado principal

Considere el siguiente controlador para el PMSM, determinado mediante ecuaciones 4 a 14.

$$V_a = -\alpha_a \tilde{I}_a + \sigma_2 \cos(N_R\theta) + R I_a^* - k_m \dot{\theta}^* \sin(N_R\theta) + h_a \quad (4)$$

$$V_b = -\alpha_b \tilde{I}_b + \sigma_5 \sin(N_R\theta) + R I_b^* + k_m \dot{\theta}^* \cos(N_R\theta) + h_b \quad (5)$$

$$I_a^* = \frac{-\tau^*}{k_m} \sin(N_R\theta) \quad (6)$$

$$I_b^* = \frac{\tau^*}{k_m} \cos(N_R\theta) \quad (7)$$

$$\tau^* = -K_p \tilde{\theta} - K_d \dot{\tilde{\theta}} + g(\theta^*) + J\ddot{\theta}^* \quad (8)$$

$$\sigma_2 = \widehat{\sigma}_2' \tau^* \dot{\theta} \quad (9)$$

$$\sigma_5 = \widehat{\sigma}_5' \tau^* \dot{\theta} \quad (10)$$

$$\dot{\widehat{\sigma}}_2' = -\Gamma_2 \tilde{I}_a \tau^* \dot{\theta} \cos(N_R\theta) \quad (11)$$

$$\hat{\sigma}'_5 = -\Gamma_5 \tilde{I}_5 \tau^* \dot{\theta} \sin(N_R \theta) \quad (12)$$

$$h_a = -\frac{L}{K_m} J \ddot{\theta}^* \sin(N_R \theta) \quad (13)$$

$$h_b = \frac{L}{K_m} J \ddot{\theta}^* \cos(N_R \theta) \quad (14)$$

Con  $\tilde{\theta} = \theta - \theta^*$  donde  $\theta^*$  es la trayectoria deseada para la posición del rotor,  $\tilde{I}_a = I_a - I_a^*$  y  $\tilde{I}_b = I_b - I_b^*$  son los errores de corrientes para la fase  $a$  y  $b$ , respectivamente, donde  $I_a^*$  y  $I_b^*$  son las corrientes deseadas.  $\Gamma_2$  y  $\Gamma_5$  son escalares constantes positivos,  $\hat{\sigma}'_2$  y  $\hat{\sigma}'_5$  son los estimados con ecuación 15.

$$\sigma'_2 = \sigma'_5 = \frac{LN_R}{k_m} \quad (15)$$

Y  $\tilde{\sigma}'_2 = \hat{\sigma}'_2 - \sigma'_2$ ,  $\tilde{\sigma}'_5 = \hat{\sigma}'_5 - \sigma'_5$  son los errores de estimación. Finalmente, las constantes escalares  $K_p$ ,  $K_d$ ,  $\alpha_a$  y  $\alpha_b$  son los parámetros del controlador los cuales para asegurar estabilidad deben cumplir algunas condiciones que serán dadas posteriormente. El diagrama a bloques del controlador se puede observar en la figura 1.

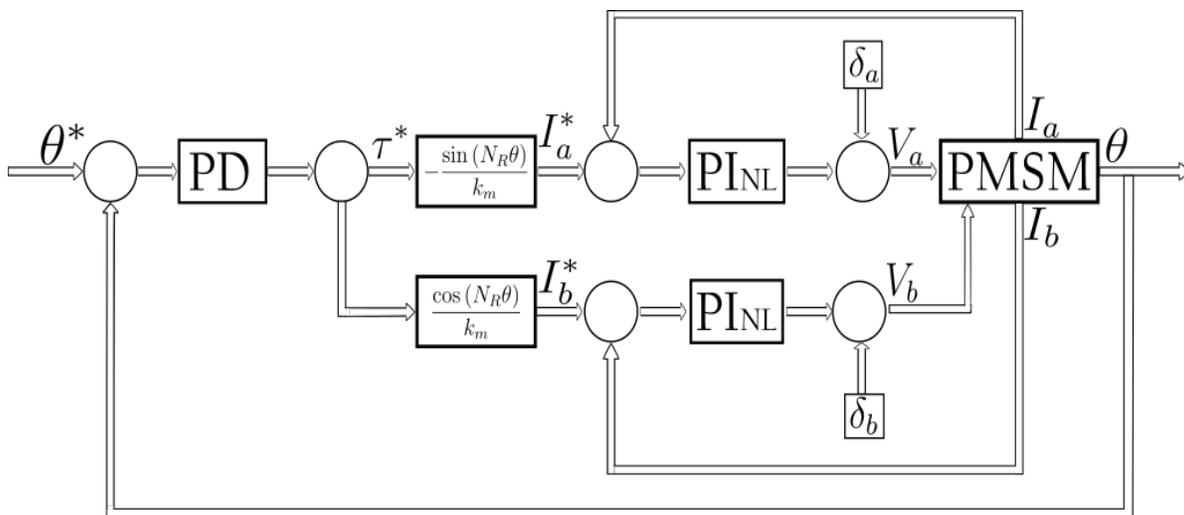


Figura 1 Sistema en lazo cerrado.

## Análisis de estabilidad

Primero, se requiere obtener la dinámica del sistema en lazo cerrado. Para esto se suman y se restan los términos  $k_m I_a^* \sin(N_R \theta)$  y  $k_m I_b^* \cos(N_R \theta)$  y utilizando las ecuaciones 6, 7 y 8 en 2 obtenemos ecuación 16.

$$J\ddot{\theta} = -k_m \tilde{I}_a \sin(N_R \theta) + k_m \tilde{I}_b \cos(N_R \theta) - K_p \tilde{\theta} - K_d \dot{\theta} - g(\theta) + g(\theta^*) \quad (16)$$

Por el otro lado, sumando y restando el término  $L I_a^*$  y utilizando las ecuaciones 4, 6, 8 y 13 en 2 obtenemos ecuación 17.

$$L\ddot{\tilde{I}}_a = -(R + \alpha_a)\tilde{I}_a + k_m \dot{\tilde{\theta}} \sin(N_R \theta) + \left(\sigma_2 + \frac{L}{k_m} \tau^* N_R \dot{\theta}\right) \cos(N_R \theta) - \frac{L K_p}{k_m} \dot{\tilde{\theta}} \sin(N_R \theta) - \frac{L K_d}{k_m} \ddot{\tilde{\theta}} \sin(N_R \theta) \quad (17)$$

Ahora, sumando y restando el término  $L I_b^*$  y utilizando las ecuaciones 5, 7, 8 y 14 en 3, obtenemos ecuación 18.

$$L\ddot{\tilde{I}}_b = -(R + \alpha_b)\tilde{I}_b - k_m \dot{\tilde{\theta}} \cos(N_R \theta) + \left(\sigma_5 + \frac{L}{k_m} \tau^* N_R \dot{\theta}\right) \sin(N_R \theta) + \frac{L K_p}{k_m} \dot{\tilde{\theta}} \cos(N_R \theta) + \frac{L K_d}{k_m} \ddot{\tilde{\theta}} \cos(N_R \theta) \quad (18)$$

Así, las ecuaciones 15, 16 y 17 representan la dinámica en lazo cerrado del PMSM (1)-(3) con el controlador (4)-(14).

Entonces, los estados del sistema son  $x = [\dot{\tilde{\theta}}, \tilde{\theta}, \tilde{I}_a, \tilde{I}_b, \tilde{\sigma}_2', \tilde{\sigma}_5'] \in \mathbb{R}^6$  y  $x = 0$  siempre es un equilibrio del sistema.

Considere la función escalar, ecuación 19.

$$V(x) = \frac{1}{2} J \dot{\tilde{\theta}}^2 + \frac{1}{2} K_p \tilde{\theta}^2 + \gamma J \tilde{\theta} \dot{\tilde{\theta}} + \frac{1}{2} L \tilde{I}_a^2 + \frac{1}{2} L \tilde{I}_b^2 + \frac{1}{2} \frac{1}{\Gamma_5} \tilde{\sigma}_5'^2 + \frac{1}{2} \frac{1}{\Gamma_2} \tilde{\sigma}_2'^2 + \frac{1}{2} \gamma K_d \tilde{\theta}^2 \quad (19)$$

La cual es definida positiva y radialmente desacotada si  $K_p > 0$ ,  $\gamma > 0$ ,  $K_d > 0$ ,  $\Gamma_2 > 0$  y  $\Gamma_5 > 0$ . Por lo que  $V(x)$  es la función candidata de Lyapunov para probar estabilidad. Tomando en cuenta varias cancelaciones, tenemos que la derivada

respecto al tiempo a lo largo de las trayectorias de la dinámica en lazo cerrado, ecuaciones 15, 16 y 17 está dada por ecuación 20.

$$\begin{aligned}
 \dot{V} = & -K_d \dot{\theta}^2 - \dot{\tilde{\theta}}(g(\theta) - g(\theta^*)) + \gamma J \dot{\theta}^2 - k_m \gamma \tilde{\theta} \tilde{I}_a \sin(N_R \theta) + k_m \gamma \tilde{\theta} \tilde{I}_b \cos(N_R \theta) - \gamma K_p \tilde{\theta}^2 \\
 & - \gamma \tilde{\theta}(g(\theta) - g(\theta^*)) - (R + \alpha_a) \tilde{I}_a^2 - \frac{LK_p}{k_m} \tilde{I}_a \dot{\tilde{\theta}} \sin(N_R \theta) \\
 & + \frac{LK_d}{J} \tilde{I}_a^2 \sin^2(N_R \theta) - \frac{LK_d}{J} \tilde{I}_a \tilde{I}_b \sin(N_R \theta) \cos(N_R \theta) + \frac{LK_p K_d}{J k_m} \tilde{I}_a \tilde{\theta} \sin(N_R \theta) \\
 & + \frac{LK_d^2}{J k_m} \tilde{I}_a \dot{\tilde{\theta}} \sin(N_R \theta) + \frac{LK_d}{J k_m} \tilde{I}_a (g(\theta) - g(\theta^*)) \sin(N_R \theta) - (R + \alpha_b) \tilde{I}_b^2 \\
 & + \frac{LK_p}{k_m} \tilde{I}_b \dot{\tilde{\theta}} \cos(N_R \theta) - \frac{LK_d}{J} \tilde{I}_a \tilde{I}_b \sin(N_R \theta) \cos(N_R \theta) + \frac{LK_d}{J} \tilde{I}_b^2 \cos^2(N_R \theta) \\
 & - \frac{LK_p K_d}{J k_m} \tilde{I}_b \tilde{\theta} \cos(N_R \theta) - \frac{LK_d^2}{J k_m} \tilde{I}_b \dot{\tilde{\theta}} \cos(N_R \theta) \\
 & - \frac{LK_d}{J k_m} \tilde{I}_b (g(\theta) - g(\theta^*)) \cos(N_R \theta) \tag{20}
 \end{aligned}$$

Haciendo uso de las siguientes propiedades  $|g(x) - g(w)| \leq k_g |x - w| \forall x, w \in \mathbb{R}$ ,  $|\sin(N_R \theta)| \leq 1$ ,  $|\cos(N_R \theta)| \leq 1$  y  $\pm ws \leq |ws| = |w||s| \forall w, s \in \mathbb{R}$ , para escribir la ecuación 20, como ecuación 21.

$$\dot{V} \leq - \begin{bmatrix} |\dot{\tilde{\theta}}| \\ |\tilde{\theta}| \\ |\tilde{I}_a| \\ |\tilde{I}_b| \end{bmatrix}^T Q \begin{bmatrix} |\dot{\tilde{\theta}}| \\ |\tilde{\theta}| \\ |\tilde{I}_a| \\ |\tilde{I}_b| \end{bmatrix} \tag{21}$$

Donde los elementos de la matriz  $Q$  son  $Q_{11} = K_d - \gamma J$ ,  $Q_{22} = \gamma K_p - \gamma K_g$ ,  $Q_{33} = (R + \alpha_a) - \frac{LK_d}{J}$ ,  $Q_{44} = (R + \alpha_b) - \frac{LK_d}{J}$ ,  $Q_{12} = Q_{21} = -\frac{K_g}{2}$ ,  $Q_{13} = Q_{31} = Q_{14} = Q_{41} = -\frac{LK_p}{2k_m} - \frac{LK_d^2}{2Jk_m}$ ,  $Q_{23} = Q_{32} = Q_{24} = Q_{42} = -\frac{\gamma k_m}{2} - \frac{LK_d K_p}{2Jk_m} - \frac{LK_d}{2Jk_m} K_g$  y  $Q_{34} = Q_{43} = \frac{LK_d}{J}$ .

Se requiere que la matriz  $Q$  sea definida positiva lo que significa que sus valores propios sean positivos o análogamente sus menores principales positivos, esto

puede ser logrado escogiendo valores adecuados para las ganancias  $K_p$ ,  $K_d$ ,  $\alpha_a$  y  $\alpha_b$ .

El primer menor principal puede ser positivo escogiendo una ganancia  $K_d$  adecuada. El segundo menor principal puede ser positivo escogiendo una ganancia  $K_p$  adecuada. Como  $Q_{33}$  y  $Q_{44}$  forman parte de los menores principales tercero y cuarto, respectivamente, los cuales dependen de las ganancias  $\alpha_a$  y  $\alpha_b$ , respectivamente, entonces estos menores principales pueden ser positivos escogiendo valores positivos suficientemente grandes de las ganancias  $\alpha_a$  y  $\alpha_b$ . Por lo tanto, la matriz  $Q$  puede ser definida positiva. Con esto aseguramos que  $\lambda_{\min}(Q) > 0$  y que  $\dot{V} \leq 0$  para todo  $x \in \mathbb{R}^6$ . Entonces, podemos escribir la ecuación 21, como ecuación 22.

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min}(Q) \left( \dot{\tilde{\theta}}^2 + \tilde{\theta}^2 + \tilde{I}_a^2 + \tilde{I}_b^2 \right) \leq 0 \quad \forall x \in \mathbb{R}^6 \quad (22)$$

Esto implica que  $\tilde{\theta} \in L_2$  que junto con  $\tilde{\theta}, \dot{\tilde{\theta}} \in L_\infty$ , nos permite utilizar el Lema de Barbalat [29] para concluir que  $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\theta}(t) = 0$  a partir de cualquier condición inicial en  $\mathbb{R}^6$ .

### 3. Resultados

En esta sección se presentan resultados obtenidos en simulación para estudiar el funcionamiento del controlador propuesto en la sección 2. Se utilizaron los valores numéricos de las constantes del PMSM reportados en [30]. Los valores utilizados son los siguientes  $R = 0.9[Ohm]$ ,  $L = 7 \times 10^{-3}[H]$ ,  $k_m = 0.25 \left[ \frac{Nm}{A} \right]$ ,  $N_R = 50$  y  $J = 1.872 \times 10^{-4}[kg.m^2]$ . La carga considerada es una barra acoplada al rotor con la masa concentrada en su extremo que tiene la siguiente función continua  $g(\theta) = \left( \frac{m_1 gl}{2} + m_0 gl \right) \sin(\theta)$  y cumple con la siguiente propiedad  $|g(x) - g(w)| \leq k_g |x - w| \quad \forall x, w \in \mathbb{R}$  con  $k_g = \frac{m_1 gl}{2} + m_0 gl$ . Los valores numéricos utilizados para el péndulo son los siguientes  $m_1 = 0.4014[kg]$ ,  $l = 0.305[m]$ ,  $m_0 = 0.3742[kg]$  y  $g = 9.81[m.s^{-2}]$ . Como trayectoria de referencia para el seguimiento de posición se utilizó un polinomio de quinto grado, teniendo como posición inicial  $\theta_0 = 0[rad]$ , posición

final  $\theta_f = 1.54[rad]$ , velocidad inicial  $\dot{\theta}_0 = 0[\frac{rad}{s}]$ , velocidad final  $\dot{\theta}_f = 0[\frac{rad}{s}]$ , aceleración inicial  $\ddot{\theta}_0 = 0[\frac{rad}{s^2}]$ , aceleración final  $\ddot{\theta}_f = 0[\frac{rad}{s^2}]$ , tiempo inicial  $t_0 = 0[s]$  y tiempo final  $t_f = 2[s]$ , entonces la trayectoria de referencia es  $\theta^*(t) = 0.2887t^5 - 1.4437t^4 + 1.925t^3$ . Los parámetros del controlador utilizados son los siguientes  $K_p = 20, K_d = 0.1, \alpha_a = 115, \alpha_b = 115, \Gamma_2 = 1$  y  $\Gamma_5 = 1$ , y fueron escogidos de tal manera que cumplen con las condiciones dadas en la Sección 2.

La simulación se realizó en Simulink® en donde se codificó el modelo del PMSM (1)-(3), el controlador (4)-(14), la trayectoria de referencia y el par de carga. El sistema en lazo cerrado utilizado para la simulación puede ser observado en la figura 2.

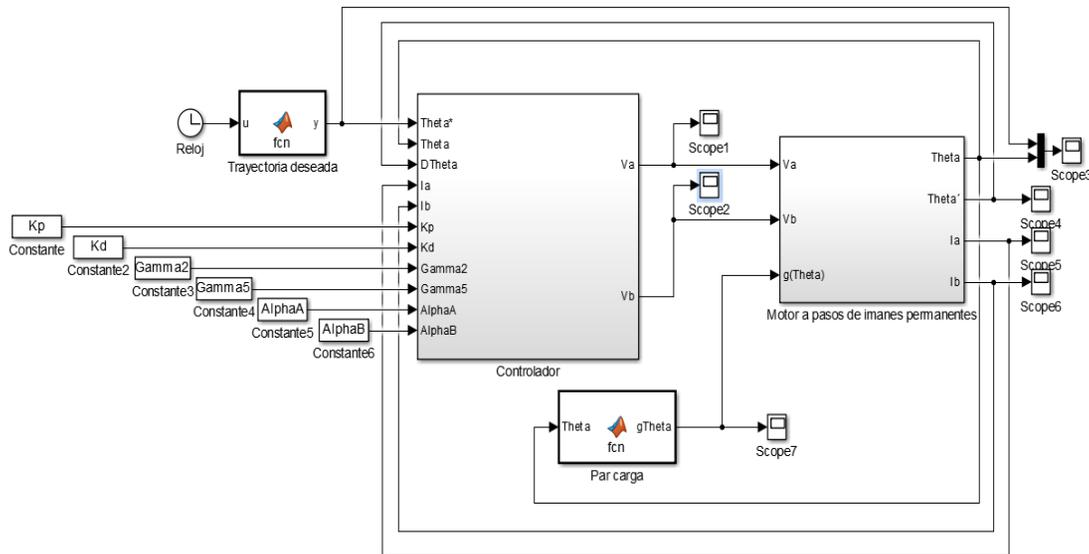


Figura 2 Simulación del sistema en lazo cerrado.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la simulación en donde se grafican las variables de posición deseada  $\theta^*$  (figura 3), posición del rotor  $\theta$ , error de posición  $\tilde{\theta}$  (figura 4), velocidad del rotor  $\dot{\theta}$  (figura 5), corrientes en las fases  $I_a, I_b$  (figura 6) y voltajes aplicados a las fases  $V_a, V_b$  (figura 7).

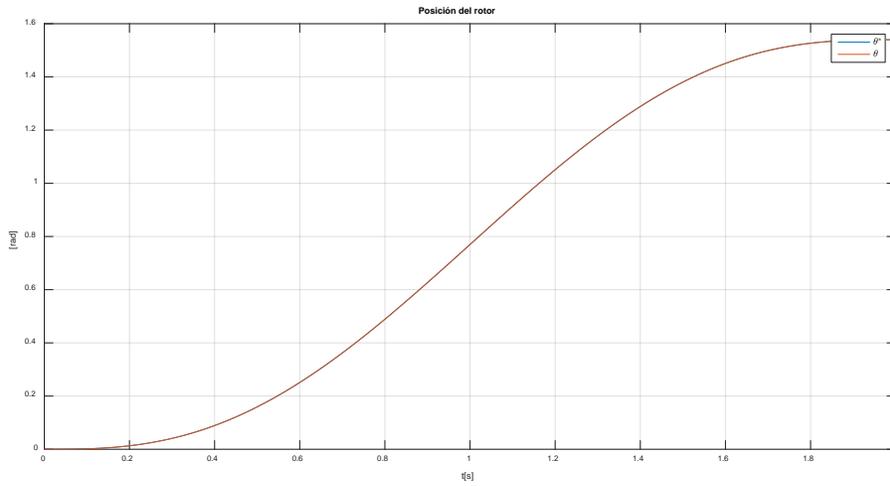


Figura 3 Trayectoria deseada y posición del rotor.

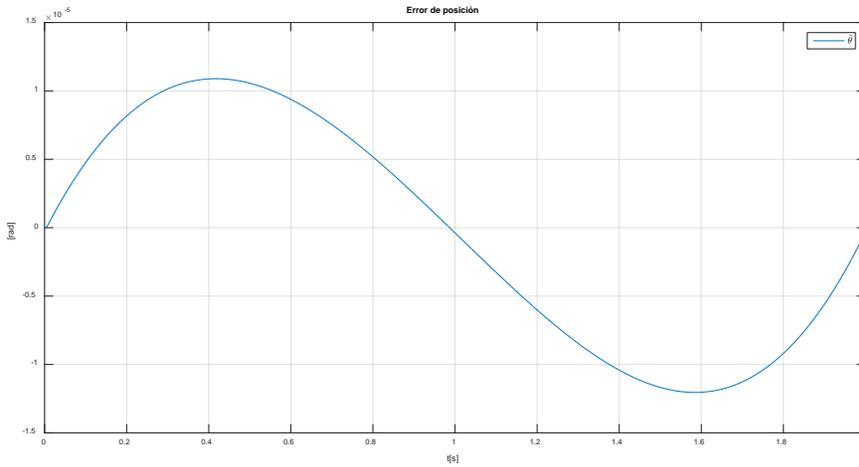


Figura 4 Error de posición.

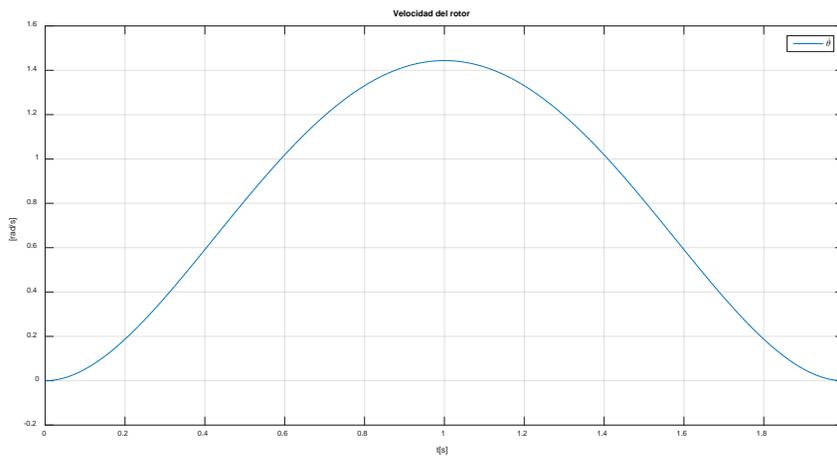


Figura 5 Velocidad del rotor.

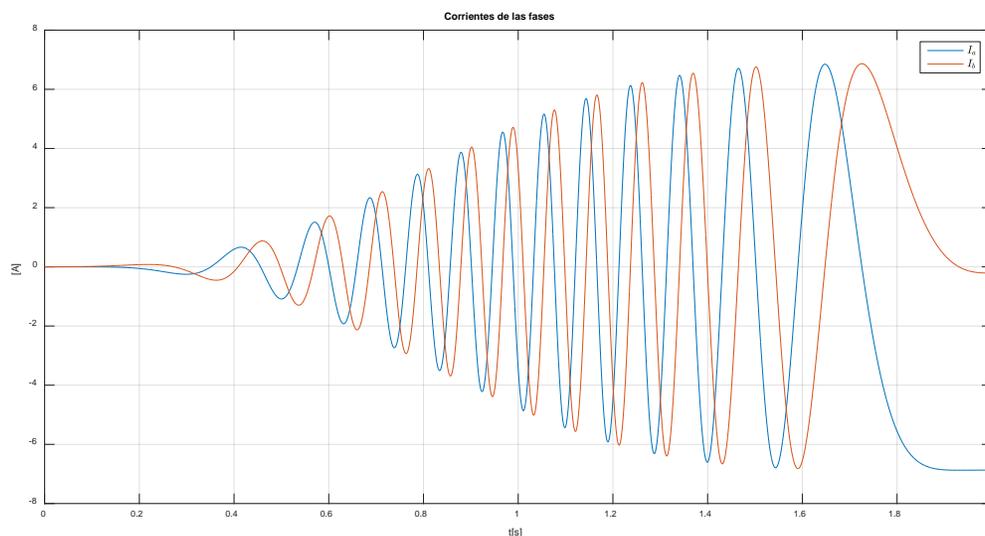


Figura 6 Corrientes de las fases.

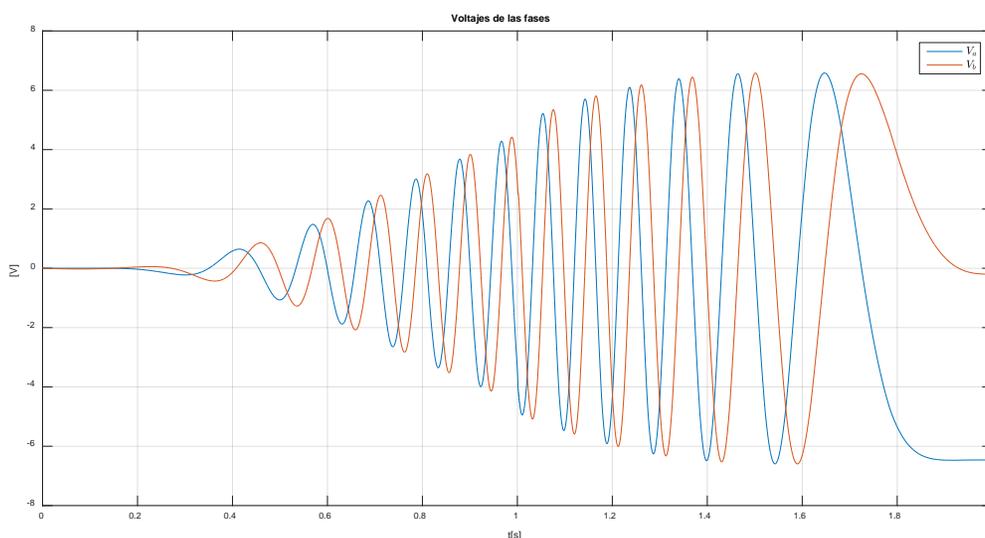


Figura 7 Voltajes aplicados a las fases.

#### 4. Discusión

Una práctica común en el control de motores es diseñar un controlador PID para generar el par deseado y lazos PI con ganancias altas en cada fase para forzar a las corrientes a llegar a sus valores deseados, lo que significa que el par generado es igual deseado. En el controlador propuesto se presenta un esquema similar excepto que son agregados algunos términos adaptativos. Los lazos PI de cada fase descritos por las ecuaciones 4 y 5 contienen los términos  $\sigma_2 \cos(N_R \theta)$  y

$\sigma_5 \sin(N_R \theta)$ , respectivamente, que funcionan como términos integrales no lineales. Se comprueba el resultado de que el error de seguimiento de posición  $\tilde{\theta}$  tiende a cero a partir de cualquier condición inicial ya que las gráficas de posición deseada y de posición del rotor se encuentran empalmadas a lo largo de toda la trayectoria como se puede ver en la figura 3 y que el error de posición es pequeño como se ve en la figura 4. Además se comprueba que el controlador puede compensar una carga que depende de la posición.

## 5. Conclusiones

En este artículo se propuso un controlador PD de seguimiento de posición para el PMSM y se probó estabilidad global del sistema en lazo cerrado utilizando el método directo de Lyapunov para demostrar que el error de seguimiento de posición tiende a cero a partir de cualquier condición inicial. Se demostró que inclusive el controlador puede compensar una carga la cual depende de la posición considerando la dinámica no lineal completa del motor. El controlador propuesto puede ser aplicado en sistemas Euler Lagrange accionados por motores a pasos de imanes permanentes en los cuales se tiene que seguir una trayectoria. Como trabajo futuro se tiene considerar el rizo de par que es generado por el espacio de aire que hay entre las ranuras de los dientes del estator lo cual hace que el flujo magnético sea no sinusoidal [31,32,33], que aunque es de pequeña magnitud se ve presente como variaciones en la velocidad y afectan el desempeño del motor [33,34].

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] M. Zribi y J. Chiasson, "Position control of a PM stepper motor by exact linearization". IEEE Trans. Automat. Contr. vol 36. No 5. 1991. pp 620–625.
- [2] J. Hu, D. M. Dawson, T. Burg y P. Vedagarbha, "An Adaptive Tracking Controller for a Brushless DC Motor with Reduced Overparameterization Effects". 33rd IEEE Conference on Decision and Control. 1994. pp 1850–1855.

- [3] H. Melkote y F. Khorrami, "Nonlinear Adaptive Control of Direct-Drive Brushless DC Motors and Applications to Robotic Manipulators". *IEEE/ASME Trans. Mech.* vol 4. no 1. 1999. pp 71–81.
- [4] M. Aiello, R. Rekowski, M. Bodson, J. Chiasson y D. Schuerer, "Experimental Results of Using an Exact Linearization Controller on a PM Stepper Motor". *IEEE Int. Conf. Eng. Syst.* no 4. 1990. pp 585–588.
- [5] F. Belkhouche y S. Muzdeka, "A linearized model for permanent magnet stepper motors". *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*. vol 1. 2003. pp 301–305.
- [6] A. J. Blauch, M. Bodson y J. Chiasson, "High-Speed Parameter Estimation of Stepper Motors". *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* vol 1. No 4. 1993. pp 270–279.
- [7] R. Delpoux, M. Bodson y T. Floquet, "Parameter estimation of permanent magnet stepper motors without position or velocity sensors". *American Control Conf.* 2012. pp 1180–1185.
- [8] R. Delpoux, M. Bodson y T. Floquet, "Parameter estimation of permanent magnet stepper motors without mechanical sensors". *Control Eng. Pract.* vol 26. no 1. 2014. pp 178–187.
- [9] A. Kapun, A. Hace y K. Jezernik, "Identification of stepping motor parameters". *EUROCON Int. Conf. Comput. as a Tool.* 2007. pp 1856–1863.
- [10] J. N. Chiasson y R. T. Novotnak, "Nonlinear speed observer for the PM stepper motor". *IEEE Trans. Automat. Contr.* vol 38. No 10. 1993. pp 1584–1588.
- [11] W. Kim, I. Choi y C. C. Chung, "Lyapunov-based control in microstepping with a nonlinear observer for permanent magnet stepper motors". *Am. Control Conf. (ACC)*. 2010. pp 4313–4318.
- [12] W. Kim y C. C. Chung, "Novel position detection method for permanent magnet stepper motors using only current feedback". *IEEE Trans. Magn.* vol 47. no 10. 2011. pp 3590–3593.

- [13] W. Kim, Y. Lee, D. Shin y C. C. Chung, “Robust nonlinear damping backstepping with augmented observer for position control of permanent magnet stepper motors”. *Proc. Am. Control Conf.* 2014. pp 5325–5330.
- [14] W. Kim, D. Shin y C. C. Chung, “Adaptive observer-based nonlinear control in microstepping for permanent magnet stepper motors”. *Proc. IEEE Conf. Decis. Control.* 2010. pp 4594–4599.
- [15] W. Kim, D. Shin y C. C. Chung, “The Lyapunov-based controller with a passive nonlinear observer to improve position tracking performance of microstepping in permanent magnet stepper motors”. *Automatica.* vol 48. no 12. 2012. pp 3064–3074.
- [16] W. Kim, D. Shin y C. C. Chung, “Microstepping using a disturbance observer and a variable structure controller for permanent-magnet stepper motors”. *IEEE Trans. Ind. Electron.* vol 60. No 7. 2013. pp 2689–2699.
- [17] D. Shin, W. Kim, Y. Lee y C. C. Chung, “Nonlinear Position Control for Permanent Magnet Stepper Motor Using Only Position Feedback”. *International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS).* 2013.
- [18] A. Ferrah, J. A. K. Bani-Younes, M. Bouzguenda y A. Tami, “Sensorless speed and position estimation in a stepper motor”. *Int. Aegean Conf. Electr. Mach. Power Electron.* 2007. pp 297–302.
- [19] C. Rusu, I. Birou y E. Szoke, “Model Based Design Controller for the Stepper Motor”. *IEEE Int. Conf. Aut. Qua. and Tes.* 2008. pp 175-179.
- [20] W. Kim, D. Shin y C. C. Chung, “Microstepping with Nonlinear Torque Modulation for Position Tracking Control in Permanent Magnet Stepper Motors”. *IEEE Conf. Dec. Control and European Control Conf.* 2011.
- [21] W. Kim, D. Shin y C. C. Chung, “Microstepping with nonlinear torque modulation for permanent magnet stepper motors”. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* vol 21. No 5. 2013. pp 1971–1979.
- [22] W. Kim, C. Yang y C. C. Chung, “Design and implementation of simple field-oriented control for permanent magnet stepper motors without dq transformation”. *IEEE Trans. Magn.* vol 47. No 10. 2011. pp 4231–4234.

- [23] F. Nollet, T. Floquet y W. Perruquetti, "Observer-based second order sliding mode control laws for stepper motors". *Control Eng. Pract.* vol 16. no 4. 2008. pp 429–443.
- [24] T. J. Tarn, A. K. Bejczy, X. Yun y Z. Li, "Effect of Motor Dynamics on Nonlinear Feedback Robot Arm Control". *IEEE Trans. Robot. Autom.* vol 7. No 1. 1991. pp 114–122.
- [25] S. D. Eppinger y W. P. Seering, "Introduction to Dynamic Models for Robot Force Control". *IEEE Control Syst. Mag.* vol 9. No 3. 2011. pp 246–251.
- [26] W. Kim y C. C. Chung, "IMP based velocity tracking controller for permanent magnet stepper motors". 8th Asian Control Conf. 2011. pp 239–244.
- [27] V. M. Hernández-Guzmán y R. V. Carrillo-Serrano, "Global PID position control of PM stepper motors and PM synchronous motors". *Int. J. Control.* vol 84, no 11. 2011. pp 1807–1816.
- [28] Y. Lee, D. Shin, W. Kim y C. C. Chung, "Nonlinear Position Control with Feedforward Low Pass Filters in Permanent Magnet Stepper Motors". *SICE Annual Conf.* 2012. pp 1308–1312.
- [29] S. Sastry y M. Bodson, "Adaptive control: stability, convergence and robustness". 1989. Englewood Cliffs: Prentice-Hall. p 19.
- [30] D. M. Dawson, J. Hu y T. C. Burg, "Nonlinear Control of Electric Machinery". 1998. Marcel Dekker. New York. Cap 3-4.
- [31] D. Chen y B. Paden, "Nonlinear adaptive torque-ripple cancellation for step motors". *Decis. Control. Proc.* 1990. pp. 1–6.
- [32] B. Hall, "Minimization of Torque Ripple in Permanent Magnet Motors: A Closed Form Solution". *Proc. 18th IEEE Ind. Elect. Conf.* 1992. pp 459–463.
- [33] D. C. Hanselman, "Minimum torque ripple, maximum efficiency excitation of brushless permanent magnet motors". *IEEE Trans. Ind. Electron.* vol 41. No 3. 1994. pp 292–300.
- [34] J. Holtz y L. Springob, "Identification and compensation of torque ripple in high-precision permanent magnet motor drives". *IEEE Trans. Ind. Electron.* vol 43. No 2. 1996. pp 309–320.

# **SISTEMA DE DETECCIÓN DE FUGA DE CAMPO MAGNÉTICO EN MATERIALES FERROMAGNÉTICOS**

***J. Jesús Villegas Saucillo***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*jesus.villegas@itcelaya.edu.mx*

***Agustín L. Herrera May***

Universidad Veracruzana  
*leherrera@uv.mx*

***José Javier Díaz Carmona***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*javier.diaz@itcelaya.edu.mx*

***Gerardo I. García Lona***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*13030277@itcelaya.edu.mx*

***Ándre Marroquín Gutiérrez***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*12030355@itcelaya.edu.mx*

***Luis Eduardo Pacheco Ríos***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*13030271@itcelaya.edu.mx*

***Guadalupe Josué Uribe Ramírez***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*uribe.josue@hotmail.com*

## **Resumen**

Un novedoso sistema detector de fuga de campo magnético (por sus siglas en inglés, Magnetic Flux Leakage, MFL), es propuesto. El Sistema ofrece flexibilidad, facilidad, adquisición del MF de tiempo real, bajo consumo de potencia, mejoras sustanciables en costo en comparación con otros sistemas. El sistema reportado está integrado por sensor detector de MFL, un motor a pasos, una tarjeta de adquisición de datos NI myRIO e instrumentación virtual LabVIEW. El objetivo principal del proyecto es detectar la fuga de campo magnético a través del método de memoria magnética de los metales (MMM) en tuberías ferromagnéticas que resultan de perturbaciones en la magnetización natural asociadas a deformaciones y cambios estructurales locales producidos durante la fabricación y uso de cuerpos ferromagnéticos [1].

**Palabra(s) Clave(s):** instrumento virtual – LabVIEW, fuga de campo magnético (MFL), sistema detector de fuga de campo magnético.

## **1. Introducción**

### **Método de Memoria Magnética (MMM)**

El uso del método de memoria magnética de los metales permite detectar alteraciones del campo magnético natural de estructuras ferromagnéticas causadas por zonas de concentración de esfuerzos residuales o discontinuidades geométricas como fisuras y cambios de espesor [2], [3].

Estos esfuerzos se concentran alrededor de defectos o heterogeneidades en los materiales ferromagnéticos, producidos durante sus procesos de fabricación o como consecuencia de la aplicación de cargas mecánicas. Las cargas mecánicas estáticas o cíclicas y la corrosión pueden provocar la propagación de fisuras y el incremento de los esfuerzos en las estructuras ferromagnéticas, causando daños severos que afectan su operación y seguridad.

El método de memoria magnética puede detectar estos defectos en tiempo real y antes que provoquen un daño crítico.

Los materiales ferromagnéticos poseen un campo magnético natural, el cual es modificado en las regiones de concentración de esfuerzos, fisuras y heterogeneidades como inclusiones no ferromagnéticas. Esta alteración del campo magnético se manifiesta mediante el cambio de dirección de las líneas del campo magnético y la modificación de su magnitud. La variación del campo magnético puede ser detectada mediante un sensor de campo magnético. Así, el tamaño y tipo de defecto puede ser relacionado con la alteración del campo magnético (figura 1).

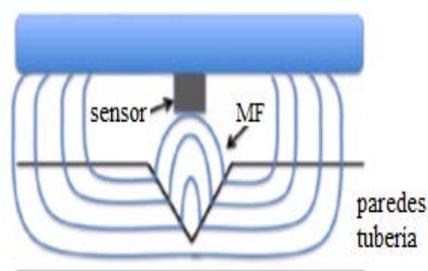


Figura 1 Dispersión de líneas de flujo magnético.

Este método no requiere generar un campo magnético externo mediante bobinas ya que utiliza el campo magnético natural de la estructura ferromagnética. Esto permite reducir el consumo de potencia y el número de elementos del sistema de supervisión.

Para el caso de estudio de la detección de MFL, existen diferentes sistemas de detección reportados en la literatura, como es el caso de [4] utiliza una tarjeta DAC NI 6023E para el registro de datos, para el codificador rotatorio y el sensor de efecto Hall. En [5] emplea una tarjeta de adquisición Adlink 2010 como interfase hacia la PC con cuatro canales para obtener la MFL. En [6] para controlar el movimiento del motor usa la tarjeta NI PCI 7352 y para el impulsor del control del motor a pasos se utiliza una tarjeta MID 7606 de NI. En la adquisición del MFL empleo la tarjeta NI DAQ 9207.

En [7] cuenta con un sistema de adquisición y procesamiento de datos los cuales son obtenidos en tiempo real así como el control de un motor a pasos y un magnetómetro digital HMR2300 para escanear materiales ferromagnéticos.

En este trabajo, un nuevo un sistema es presentado, el cual consiste de 4 etapas, una de ellas es del sensor detector de campo magnético, la segunda de un control de un motor a pasos, la tercera de una tarjeta de adquisición de datos NI myRIO y la última, la instrumentación virtual LabVIEW. La propuesta del sistema tiene la ventaja respecto a otros sistemas que su operación es muy simple, bajo costo, bajo consumo de potencia. La adquisición del MFL y el control del motor a pasos es controlado por la tarjeta NI myRIO, (figura 2). En las siguientes secciones se explica más a detalle cada una de las etapas.

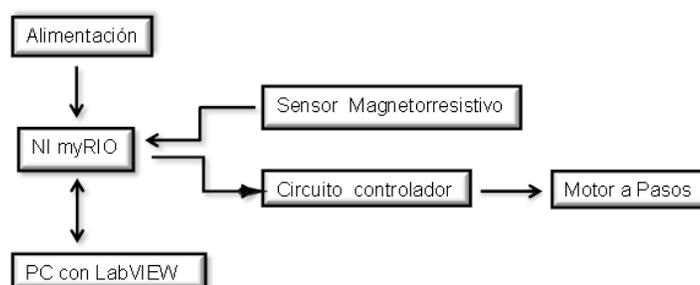


Figura 2 Diagrama de bloques del sistema de detección de MFL.

## Sensor

El sistema detector de MFL mediante el sensor apropiado. Para su selección se analizaron varias opciones las cuales se presentan de manera comparativa (tabla 1). Se optó por el sensor MAG3110, [8] por las siguientes características:

- El sensor magnetoresistivo es muy sensible al campo magnético de la tierra, el voltaje de alimentación es óptimo para el trabajo a realizar pues es uno de los que opera con menor rango, el protocolo de comunicación que maneja en este caso es I2C, es compatible y optimo con la tarjeta NI myRIO.
- El sensor detecta las componentes en los tres ejes axiales del campo magnético de fuga, su sensibilidad es la más adecuada de los 5 sensores y su precio es el más accesible de todos.
- El efecto magnetoresistivo consiste en el cambio de la resistividad eléctrica de un material debido a la variación del campo magnético al que está sometido. Ventaja del sensor magnetoresistivo es la ausencia de contactos

mecánicos entre elemento activo y estímulo externo, de modo que se evita el desgaste mecánico del sensor, incrementando su vida útil y su fiabilidad.

Tabla 1 Sensores ferromagnéticos.

Modelo / Características	AS5410	MLX90363	HMC5843	HMC5883L	MAG3110
Voltaje de entrada	3.0 -3.6 V	3.3 - 5V	2.5 – 3.3V	2.16 – 3.6 V	1.95 – 3.6V
Corriente de entrada	15mA	15.5mA	900µA	100µA	900 µA
Protocolo	SPI	SPI	I <sup>2</sup> C	I <sup>2</sup> C	I <sup>2</sup> C
Sensibilidad	-	-	7mG	4.35mG	1mG
Resolución	14bits	14bits	12bits	12bits	12bits
Campo Máx.	±200mT	±700mT	±1T	-	±0.1T
Frecuencia	1000Hz	1000Hz	50Hz	160Hz	80Hz
Precio(Dls)	3.75	4.99	2.99	3.37	1.49
Distancia típica	50mm	6mm	Geomagnético	Geomagnético	Geomagnético
Rango Bx, By	1500G	500G	4G	8G	10G
Rango Bz	1200G	750G	4G	8G	10G

## Motor a pasos

El motor a pasos también llamado motor paso a paso se emplean principalmente en aplicaciones de medición y control. El motor paso a paso sin escobillas, es un dispositivo electromecánico que convierte los pulsos eléctricos en movimientos mecánicos discretos. El eje de un motor gira en incrementos de pasos discretos. El motor empleado es el modelo 28BYJ-48 unipolar con un impulsor ULN2003. Este motor se seleccionó debido a su bajo costo, pequeño tamaño y su buen torque para mover piezas de peso considerable [9], [10].

El funcionamiento del impulsor del motor, comienza a partir del corrimiento de señales de modulación de ancho de pulso (PWM) que indican al motor la velocidad de giro. La secuencia de su funcionamiento se realizó de acuerdo (tabla 2) [9]

Tabla 2 Secuencia de funcionamiento del motor a pasos [9].

Color del cable	Dirección de las manecillas del reloj (1-2 Fase)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
4 naranja	-	-						-
3 amarillo		-	-	-				
2 rosa				-	-	-		
1 azul						-	-	-

## **Instrumentación Virtual (LabVIEW)**

La abreviación de LabVIEW, es un Laboratorio de Instrumentación Virtual y Banco de Trabajo, que corresponde a un lenguaje de programación virtual. LabVIEW es un entorno altamente productivo, permite el desarrollo de la creación de aplicaciones personalizadas que interactúan con el mundo real, en campos como la ciencia y la ingeniería.

LabVIEW es único, ya que hace que esta gran variedad de herramientas esté disponible en un solo ambiente. LabVIEW desarrolló un ambiente para la solución de problemas que conduce a incrementar la productividad y la innovación continua [10], [11].

LabVIEW es un lenguaje de programación que utiliza iconos en lugar de líneas de texto para crear aplicaciones. En contraste con la programación basada en líneas de texto donde las instrucciones determinan la ejecución del programa. LabVIEW utiliza la programación de flujo de datos, donde el flujo de datos determina la ejecución [11].

En LabVIEW, se construye una interfaz de usuario con un conjunto de herramientas y objetos. La interfaz de usuario se conoce como panel frontal. A continuación, agregar código usando representaciones gráficas de funciones para el control de los objetos del panel frontal. El diagrama de bloques contiene este código. En cierto modo, el diagrama de bloques se asemeja a un diagrama de flujo.

Los programas de LabVIEW se denominan instrumentos virtuales, o VI's, porque su apariencia y operación imitan instrumentos físicos, tales como osciloscopios y multímetros. Cada VI utiliza funciones que manipulan la entrada desde la interfaz de usuario o de otras fuentes y muestran esa información o es movida a otros archivos u otros ordenadores [11]. Hoy en día la programación basada en LabVIEW es un medio líder en el campo de la informática basada medición y adquisición de datos [10], [11].

## **NI myRio**

La tarjeta myRio, es un hardware desarrollado por National Instruments, Texas Instruments lo ha utilizado para adquirir y procesar señales en tiempo real. La

abreviación de RIO significa que es portátil reconfigurable de entrada/salida. Consiste de un procesador y FPGA incrustado en él y es compacto. Se compone de dos puertos de expansión (MXP) conectores A y B para llevar en conjunto señales idénticas y tienen 34 pines de salidas y un mini sistema de puerto (MSP) llamado Conector C, [10]. Las señales pueden ser adquiridas y procesadas en LabVIEW y las señales generadas se pueden utilizar en tiempo real. El NI myRIO proporciona varias entradas analógicas (AI) y varias salidas analógicas (AO) entradas y salidas analógicas (DIO), (figura 3), [12].

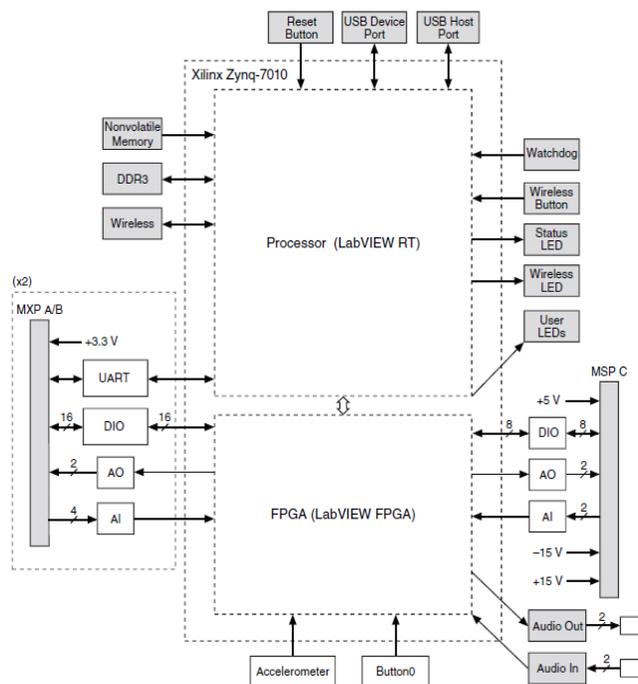


Figura 3 Diagrama de bloques del hardware de NI-myRIO [12].

## 2. Desarrollo

Para detectar la fuga de flujo magnético a través del MMM de tuberías ferromagnéticas, el sensor obtiene las señales producidas por el defecto geométrico del elemento, por lo que la transferencia de los datos del sensor al sistema los realiza a través del protocolo de comunicación I2C.

Posteriormente la tarjeta de adquisición de datos myRIO a través del protocolo de comunicación I2C y de su software, procesan las señales obtenidas,

inmediatamente las señales obtenidas pasan a través de la interfaz de LabVIEW quién permite crear un instrumento virtual visible en el monitor de la PC.

El motor a pasos es controlado a través de la interfaz de la tarjeta myRIO y el instrumento virtual - LabVIEW, para posteriormente ser visible en el monitor de la pantalla de la PC. Todo lo anterior, se detalla en la siguiente sección.

## Funcionamiento

La interfaz de LabVIEW permite crear un instrumento virtual (VI) para el control de los sistemas involucrados en el proceso completo de detectar el MF del defecto del tubo ferromagnético, controlar el giro del tubo, acoplar el sensor a una distancia óptima para su funcionamiento de la superficie, registrar los datos de manera gráfica, y presentar resultados de manera fácil y legible.

## Sensor

El instrumento virtual para la detección de fugas de campo magnético debido a fallas geométricas se desarrolló en LabVIEW (figura 4). Teniendo como base principal el protocolo de comunicación I2C y el procesamiento de las señales necesario para obtener una lectura confiable. A continuación se explica el VI del sensor y de cada uno de los bloques con los que está diseñado.

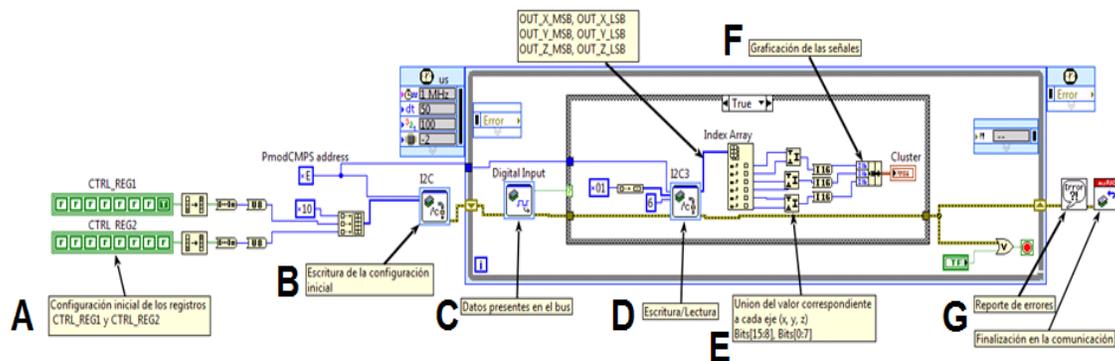


Figura 4 Instrumento virtual para la detección de fuga de campo magnético.

En la etapa A, se inicializaron los registros CTRL\_REG1 y CTRL\_REG2 utilizando estados lógicos para crear un byte de información, estos registros son enviados al

ciclo WHILE principal, los bytes se concatenan para ser enviados a la inicialización del protocolo I2C. En la etapa B, corresponde a la escritura de la configuración inicial. En la etapa C, un bloque de entrada digital, inserta los datos presentes en el bus del sensor, lo cual lleva a un ciclo de condiciones TRUE y FALSE; para la condición FALSE, simplemente implica que no existe información. En el caso de la condición TRUE se encuentra en un bloque del protocolo de comunicación I2C.

En la etapa D, representa la escritura o lectura de la tarjeta myRIO y una serie de datos procedentes del sensor. Esta serie de datos procedentes del sensor se organizan y en la etapa E, se realiza la unión de los valores correspondientes a cada eje y obtener sus gráficas correspondientes a x, y y z.

En la etapa F, la condición para detener el ciclo es simplemente la detección de un error en el instrumento virtual o el botón de paro. Posteriormente se termina la comunicación al final del ciclo y se agrega un reporte de errores para la depuración del instrumento.

En la etapa G, corresponde al bloque de reporte de errores los cuales ya están inicializados para esa función por medio del protocolo I2C, y sirven para dar una explicación de los errores en la comunicación en la lectura de los datos del sensor o de los registros que se escriben.

### **Control del motor**

El motor se utilizó para hacer girar a velocidad constante el tubo ferromagnético y conocer su posición angular exacta para obtener una lectura adecuada a través del sensor y ayudar a identificar el defecto. El VI se creó a partir de un corrimiento de señales de modulación de ancho de pulso (PWM) que le indican al motor la velocidad de giro. El instrumento virtual se puede observar en la figura 5.

El VI inicia con un valor entregado a un ciclo WHILE para inicializar el impulsor del motor y el motor a una posición inicial. Después, con ayuda de un botón de inicio entra a un ciclo CASE para el cuál se programan las definiciones de las condiciones para que el impulsor del motor indique una vuelta completa, es posible también realizar el giro en sentido contrario, esto con una decisión booleana que indica reversa y el sentido del giro del motor. Para este proceso es también necesario

utilizar un CLOCK para mantener la velocidad y el giro de motor usando una perilla desde el panel de control.

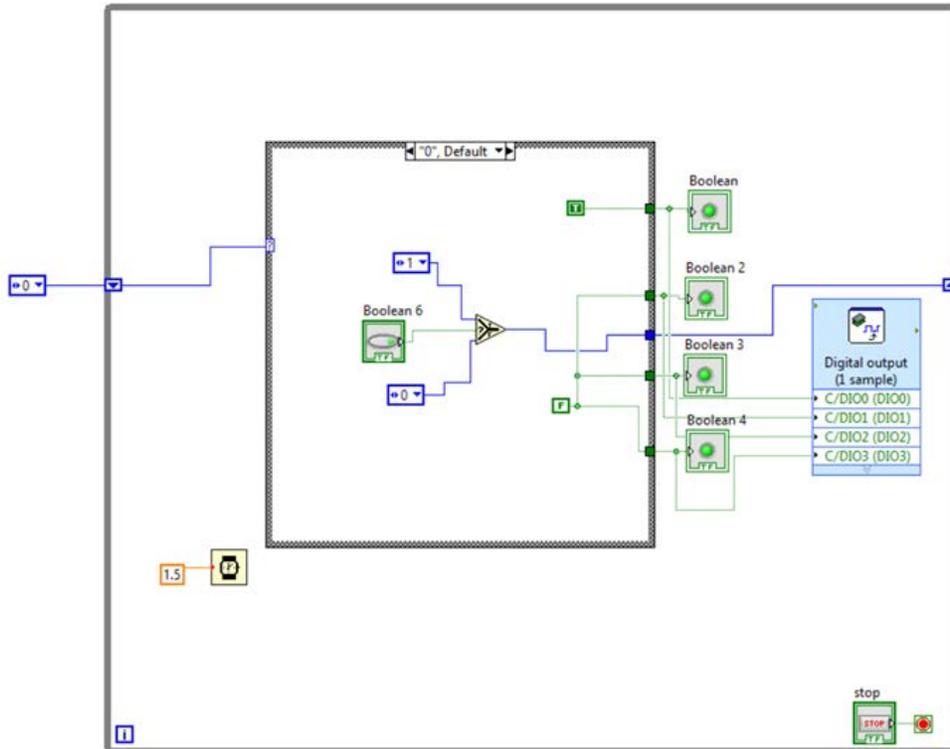


Figura 5 Instrumento virtual para el control de giro del motor.

Finalmente, la condición para detener el ciclo WHILE se crea de la misma manera que el VI de la detección de fallas geométricas con uso de un sensor, por medio de la aparición de un error o de manera manual con el uso de un botón de paro, STOP.

### Defectos geométricos

Durante el proceso de fabricación, aplicación de cargas mecánicas, exposición a severas condiciones de trabajo y la corrosión pueden provocar alteraciones del campo magnético natural de estructuras ferromagnéticas causadas por zonas de concentración de esfuerzos residuales o discontinuidades geométricas como fisuras, grietas y cambios de espesor. La propagación de fisuras, grietas y el incremento de los esfuerzos en las estructuras ferromagnéticas, causando daños severos que afectan su operación y seguridad.

En este trabajo de investigación se analizaron discontinuidades geométricas en tuberías ferromagnéticas bajas en carbono de acero estructural A36 o ASTM A36 (figura 6a) con las siguientes dimensiones, longitud 62.4mm, profundidad 2.10mm y anchura 3.60m, correspondientes a un defecto rectangular (figura 6b).

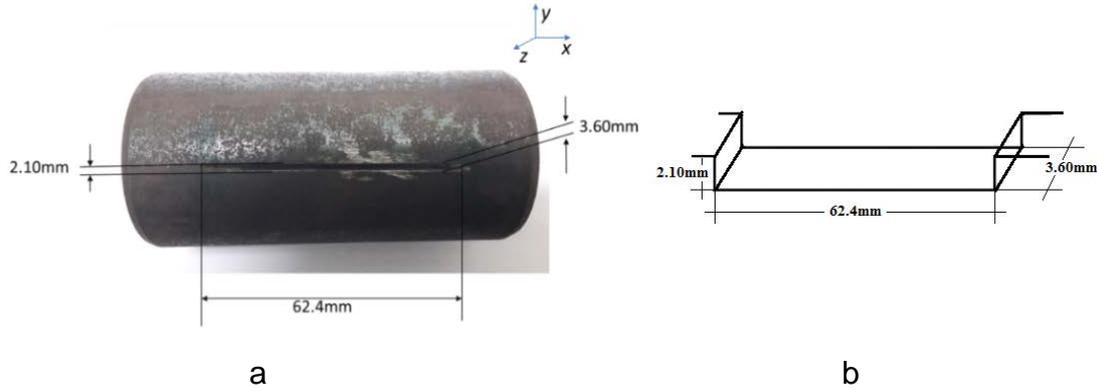


Figura 6 Defecto geométrico en un elemento ferromagnético.

El método de MMM se aplicó para detectar la fuga de campo magnético producido por el defecto geométrico. La Teoría del MMM ha demostrado que la variación máxima de campo de fuga magnética dispersa ( $H_p$ ) se produce en la zona de concentración de tensiones y zona de deformación; es decir, la componente tangencial de fuga del campo magnético  $H_p(x)$  muestra el valor máximo, mientras que el componente normal de la  $H$  de la fuga de campo magnético  $H_p(y)$  muestra que es cero (figura 7).

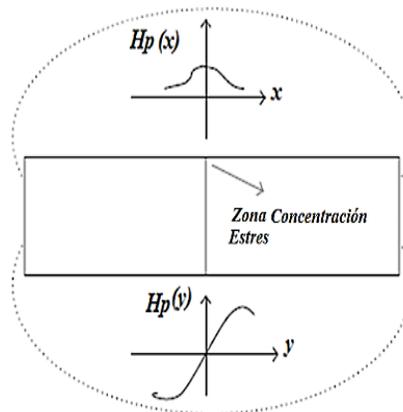


Figura 7 Grafica característica de un defecto geométrico con el MMM [12].

### 3. Resultados

Para poder detectar la fuga de campo magnético de una tubería ferromagnética se procedió a construir un prototipo experimental (figura 8) con el cual se hace girar el tubo de acuerdo a la horizontal para medir la fuga de campo magnético con el método de memoria magnética. El prototipo experimental se construyó con el uso del juego didáctico Lego Education Mindstorms EV3.

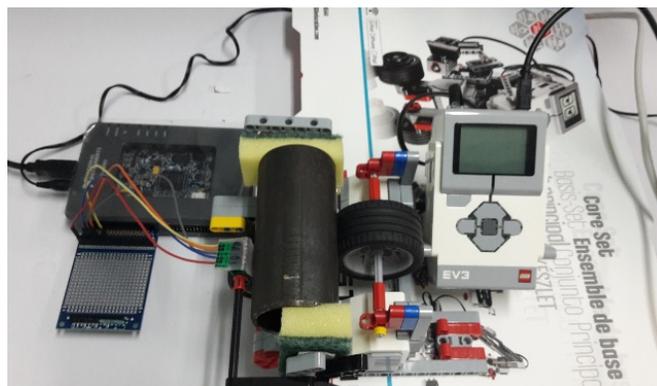


Figura 8 Prototipo experimental para detectar la fuga de campo magnético.

Para explorar toda la circunferencia de la tubería se colocó el sensor a 2mm de distancia al tubo (figura 9) con sus ejes normales a la superficie.

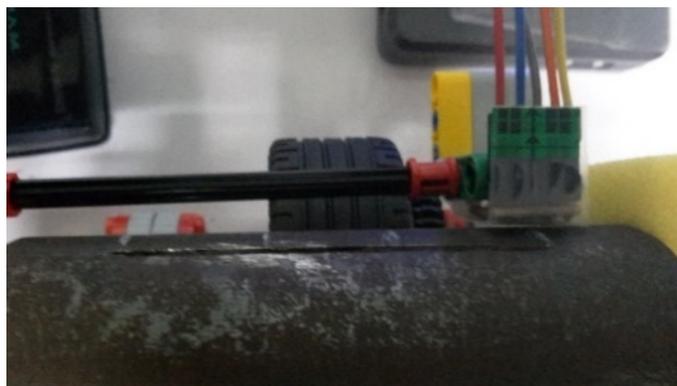


Figura 9 Sensor ubicado frente a la tubería ferromagnética.

Las señales de fuga de campo magnético del tubo ferromagnético se realizaron a 50mm de longitud del tubo (figura10).

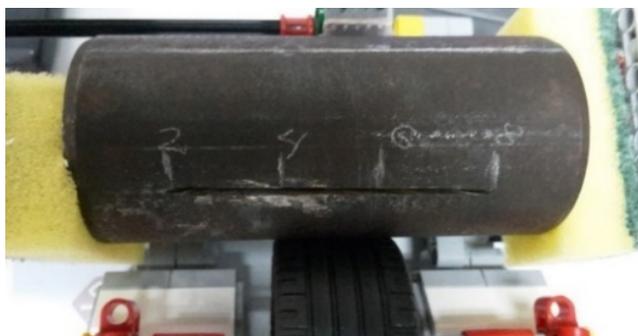


Figura 10 Discontinuidad geométrica 50 cm.

Las señales obtenidas de la medición del campo magnético en cercanías del defecto se muestran a continuación. La componente longitudinal (figura 11), donde la señal obtenida es constante y paralela al eje del tiempo (segundos) de la medición. Por lo que su componente es cero. La gráfica corresponde un giro de la tubería.

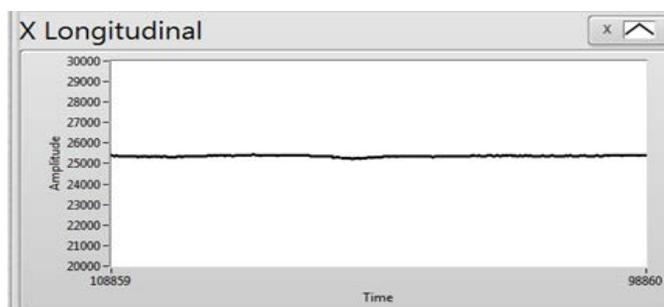


Figura 11 Componente longitudinal de discontinuidad geométrica.

La componente tangencial (figura 12), muestra la señal obtenida del campo magnético de fuga. La gráfica corresponde un giro de la tubería.

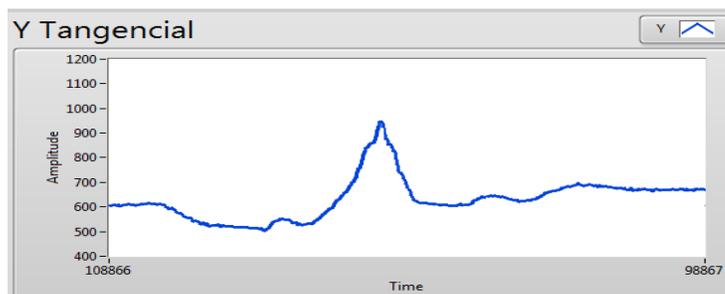


Figura 12 Componente tangencial de la discontinuidad geométrica.

La componente normal del campo magnético de fuga (figura 13), la cual corresponde a un giro del tubo.

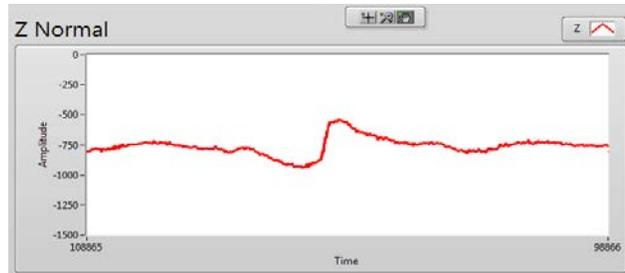


Figura 13 Componente normal de la discontinuidad geométrica.

Otra de las mediciones del campo magnético de fuga se realizó a 40mm de longitud del tubo, (figura 14). En la figura 15 y 16, se exhiben las señales obtenidas del campo magnético medido en unidades de Teslas (T) que corresponde al eje vertical contra el tiempo (ms) de ejecución de la medición de eje horizontal.



Figura 14 Discontinuidad geométrica a 40mm del borde de la tubería.

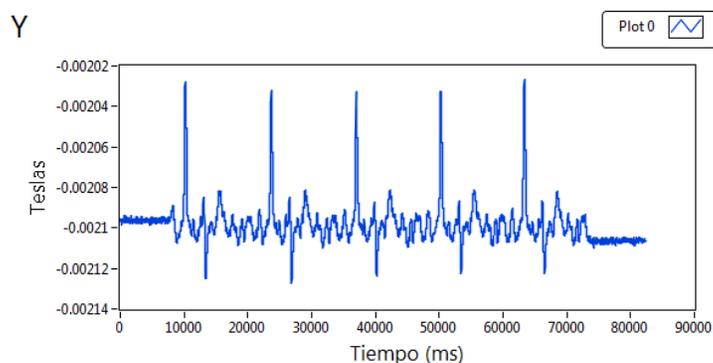


Figura 15 Componente tangencial de la discontinuidad geométrica.

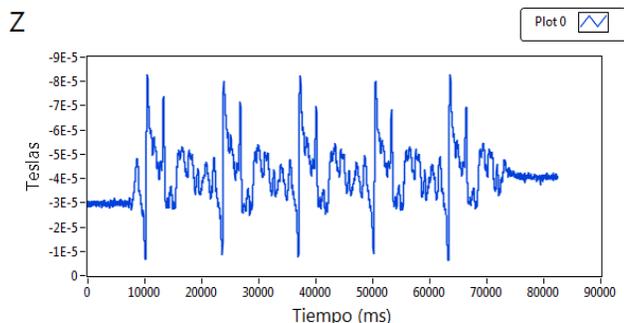


Figura 16 Componente normal de la discontinuidad geométrica.

La componente tangencial (figura 15), muestra la señal obtenida del campo magnético de fuga. Se gráfica el campo magnético (Teslas) contra el tiempo (ms). Estos resultados corresponden a 5 giros del tubo con referencia al defecto.

Estos resultados muestran una fuga de campo magnético que oscila entre  $-0.00212$  y  $-0.00204$  Teslas durante más de 8 segundos.

La componente normal (figura 16), muestra la señal obtenida del campo magnético de fuga. Se gráfica el campo magnético (Teslas) contra el tiempo (ms). Estos resultados corresponden a 5 giros del tubo con referencia al defecto.

Estos resultados muestran una fuga de campo magnético que oscila entre  $-1e-5$  y  $-8e-5$  Teslas durante más de 8 segundos.

Se desarrolló un modelo matemático experimental en 2D basado en [13] para detectar el campo magnético de fuga del defecto propuesto en la sección 2.1.3.

En la gráfica (figura 17) se muestra el resultado de la componente normal de la simulación en Matlab a una distancia de 50mm de longitud del tubo ferromagnético. Se graficó el campo magnético de fuga (A/m) contra la distancia en el centro del defecto (mm). El campo magnético de fuga oscila entre  $0.05A/m$  y  $-0.25A/m$ .

Las gráficas de la componente normal de los resultados experimentales y de la simulación varían considerablemente. La simulación se acerca más al resultado óptimo esperado, mostrando que entre mayor sea la longitud del defecto mayor será el periodo de la señal y entre mayor sea la amplitud de la señal mayor es la profundidad del defecto.

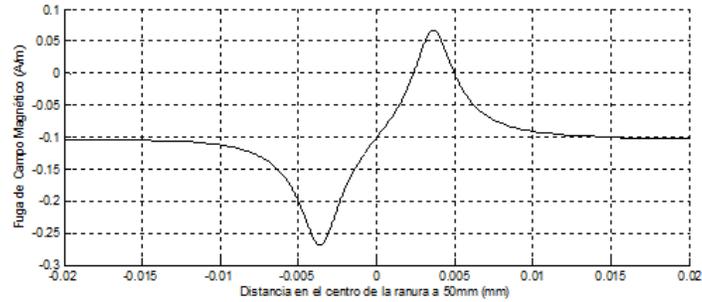


Figura 17 Simulación del campo magnético de fuga.

### Trabajos futuros

El prototipo experimental puede mejorarse en la construcción de un prototipo definitivo (figura18), con el cual se eliminará la existencia de vibraciones mecánicas y desplazamientos que conllevan a variaciones de la posición del sensor respecto a la tubería. Estas perturbaciones pueden afectar gravemente las mediciones. Aunque puede reducirse sus efectos mediante filtrado u otros métodos, lo cual es otra parte importante de los trabajos futuros.

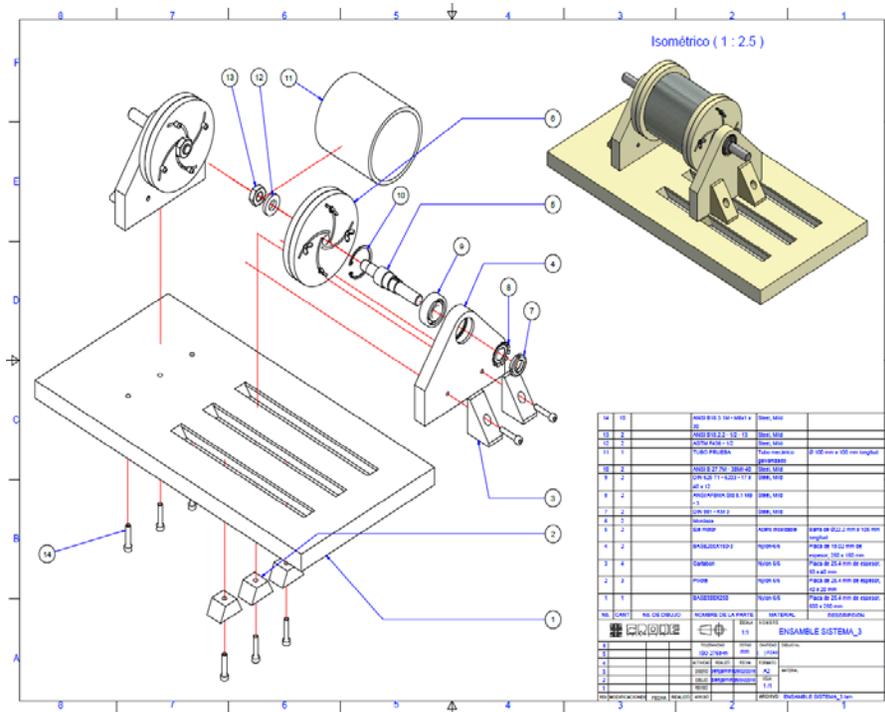


Figura 18 Prototipo sugerido para la detección de MFL en tubos ferromagnéticos.

Un sistema de detección de MF más eficiente debe ser capaz de diferenciar las señales de interés de aquellas provenientes de las perturbaciones.

Este problema, se agrava si consideramos también que la forma de las señales que nos interesan pueden ser tan irregulares como lo sea la discontinuidad que las genera.

Para esto, es necesario un estudio exhaustivo de las señales provenientes de distintos tipos de discontinuidades para poder obtener una mejor caracterización de las mismas, lo que permitirá una identificación más clara de los defectos mediante patrones estadísticos y la implementación de algoritmos de reconocimiento de señales.

Desarrollar un modelo matemático experimental en 3D con las dimensiones propuestas y a la vez desarrollar un modelo base para diferentes defectos ya sea para geometrías rectangulares, cilíndricas y esféricas.

#### **4. Discusión**

En este trabajo se presentaron las bases para la experimentación y aplicación de instrumentos virtuales - LabView para el control de un motor a pasos que proporciona el giro de un tubo ferromagnético y para la obtención del campo magnético de fuga a través de un sensor, todo ello por medio de la interfaz con la tarjeta myRio. Así como también la simulación de un modelo matemático experimental en 2D.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el sistema propuesto es funcional para la detección del campo magnético de fuga asociado a una discontinuidad geométrica de un material ferromagnético. Sin embargo, es necesario encontrar la relación del valor obtenido de fuga del campo magnético con respecto a posición y severidad de la discontinuidad que le provoca.

Por lo anterior el sistema descrito en este artículo constituye la etapa inicial de un proyecto que ésta siendo desarrollado, en el que se tiene como objetivo lograr una caracterización cuantitativa de las discontinuidades presentadas.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se propuso e implemento un prototipo de un sistema de detección de fuga de campo magnético (MFL) de materiales ferromagnéticos mediante el método de memoria magnética de los metales (MMM) para detectar defectos geométricos en tuberías ferromagnéticas.

El sistema presentado en relación a los reportados en la literatura brinda la adquisición del campo magnético de fuga en tiempo real, bajo consumo de potencia, mejoras sustanciables en costo, flexibilidad y facilidad de manipulación debido a que la adquisición del MFL y el control del motor a pasos son gobernados por la tarjeta NI myRIO. El sistema reportado está integrado por sensor detector de MFL (MAG3110), un motor a pasos, 28BYJ-48 unipolar con un impulsor ULN2003, una tarjeta de adquisición de datos NI myRIO - 1900 e instrumentación virtual LabVIEW 2014.

Con ello se logró detectar una discontinuidad geométrica de tubería ferromagnética baja en carbono de acero estructural A36 o ASTM A36, con dimensiones de longitud 62.4mm, profundidad 2.10mm y anchura 3.60m. Se desarrolló un modelo matemático experimental en 2D para adquirir la simulación del campo magnético de fuga con las dimensiones mencionadas anteriormente.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] R. Suárez Ántola, El método de ensayo no destructivo basado en la memoria magnética de los metales y sus fundamentos físicos, RSPC/MBA vol.16 N° 2 pp. 129-147 ISSN 0379-9123.
- [2] A. Dubov, S. Kolokolnikov, Application of the metal magnetic memory method for detection of defects at the initial stage of their development for prevention of failures of power engineering welded steel structures and steam turbine parts. *Weld World* 2014; 58: 225–236.
- [3] L. Zhilin, L. Lutao, J. Zhang, Signal feature extraction and quantitative evaluation of metal magnetic memory testing for oil well casing based on data preprocessing technique. *Abstract and Applied Analysis* 2014; 902304.

- [4] A. Montgomery, P. Wild, P. L. Clapham, "Factors Affecting Magnetic Flux Leakage Inspection of Tailor-Welded Blanks", *Research in Nondestructive Evaluation*, vol. 17, N° 2, pp. 85-99, Julio 2006.
- [5] P. Wang, S. Zhu<sup>1</sup>, G. Yun Tian, H. Wang, J. Wilson, X. Wang, Stress measurement using magnetic Barkhausen noise and metal magnetic memory testing, *IOP Publishing, Meas. Sci. Technol.* 21 (2010) 055703 (6pp).
- [6] V. Suresh, A. Abudhahir, An Analytical Model for Prediction of Magnetic Flux Leakage from Surface Defects in Ferromagnetic Tubes, *Measurement Science Review*, 16, (2016), No. 1, 8-13.
- [7] L. Xiao-Meng, D. Hong-sheng, B. Shi-Wu; Research on the stress-magnetism effect of ferromagnetic materials based on three-dimensional magnetic flux leakage testing; *NDT&E International* No. 62, 2014, page 50–54.
- [8] <https://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Sensors/Magneto/MAG3110.pdf>.
- [9] <http://www.raspberrypi-spy.co.uk/wp-content/uploads/2012/07/Stepper-Motor-28BJY-48-Datasheet.pdf>.
- [10] A. Ganesan, R. Nhizanth, S. Kamban, G. Renganathan; Stepper Motor Control using LabVIEW and NI-myRIO, *IJSRD - International Journal for Scientific Research & Development*,| Vol. 2, Issue 12, 2015. ISSN (online).
- [11] National Instruments, LabVIEW™ User Manual, April 2003 Edition Part Number 320999E-01 (online).
- [12] Z. Liu, L. Liu; J. Zhang; Signal Feature Extraction and Quantitative Evaluation of Metal Magnetic Memory Testing for Oil Well Casing Based on Data Preprocessing Technique, *Abstract and Applied Analysis* Volume 2014, Article ID 902304, 9 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/902304>.
- [13] C. Edwards and S.B. Palmer. The Magnetic Leakage Field of Surface-Breaking Cracks; *Journal of Physics D: Applied Physics*, 19:657-673, 1986.