

CARACTERIZACION DE DISPOSITIVOS LOGICOS PROGRAMABLES IMPLEMENTADOS EN UN PÉNDULO INVERTIDO ACCIONADO HIDRAULICAMENTE

RIGAN ARBEY ARCHILA TORRES

Ingeniero Mecatrónico

Universidad Autónoma de Bucaramanga, UNAB

reagan_arbey@hotmail.com

JOHN FABER ARCHILA DIAZ

Magíster en Ciencias en Ingeniería Mecánica, UFRJ, Brasil.

Profesor Investigador Universidad Industrial de Santander UIS

Grupo de investigación de robótica de servicio y diseño industrial GIROD

jfarchid@uis.edu.co

JAVIER MAURICIO CASTELLANOS

Magíster en Ciencias Térmicas y Energía

Profesor Asociado Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga

Grupo de Investigación en Desarrollo Tecnológico, Mecatrónica y Agroindustria, GIDETHECMA

Javier.castellanos@upbbga.edu.co

Fecha de Recibido: 31/03/2010

Fecha de Aprobación: 26/05/2010

RESUMEN

Los autómatas programables (PLC's), los módulos de adquisición de datos (fieldpoint) y los microcontroladores, son algunos de los dispositivos usados actualmente como plataforma para los sistemas de control, dichos sistemas permiten realizar tareas repetitivas con precisión y seguridad, buscando garantizar la calidad de los productos en el proceso de producción. Algunas de las características fundamentales de los dispositivos de control son: velocidad de respuesta, tiempo de muestreo, precisión y estabilidad en los procesos industriales, estos datos no siempre son ofrecidos por los fabricantes, dificultando así la selección adecuada del sistema de control a implementar. En el presente artículo producto de un trabajo de investigación se comparan las funcionalidades de 3 dispositivos de control, implementados en un péndulo invertido que es accionado mediante un sistema electrohidráulico y un sistema electrónico de potencia, este mecanismo es diseñado y construido para servir como punto de comparación entre los diferentes dispositivos de control, ya que dependiendo del diseño del péndulo y de las características del mismo, es posible evaluar tanto la resolución como el tiempo de respuesta de dispositivos lógicos programables, estos parámetros de precisión, son vitales para la correcta selección de los sistemas de control implementados en la industria.

PALABRAS CLAVE: Autómatas programables, fieldpoint, microcontroladores, dispositivos de control, sistemas de control, automatización industrial, tiempo de muestreo, diseño mecatrónico.

ABSTRACT

The programmable logic controllers (PLC's), data acquisition modules (FieldPoint) and microcontrollers, are devices used currently as a platform for control systems, these systems allow perform repetitive tasks accurately and safely, seeking to ensure the quality of the products in the production process. Some of the principal features of control devices are: response speed, sampling time, precision and stability in industrial processes, these data are not always offered by manufacturers, thus hindering the appropriate control system selection to implement. This research work compares features of three device control, implemented in a pendulum drive by a electrohydraulic and electronic system, this mechanism is designed and built to serve as a point of comparison between different control devices, since depending on the design of the pendulum and its characteristics, is possible to evaluate the

resolution and response time of these devices, these precision parameters are vital for the correct selection of control systems deployed in the industry.

KEY WORDS: Programmable Logic Controllers, Field Point, microcontrollers, control devices, control systems, industrial automation, sampling time, mechatronic design.

1. INTRODUCCIÓN

Desde el año 85 D.C., la automatización había existido en una escala pequeña, (mecanismos animados de Heron de Alejandria [1], utilizando mecanismos simples para automatizar tareas sencillas de manufactura. Sin embargo el concepto solamente llego a ser realmente práctico con la evolución de las computadoras digitales, cuya flexibilidad permitió manejar cualquier clase de tarea. Las computadoras digitales con la combinación requerida de velocidad, poder de cómputo, precio y tamaño empezaron a aparecer en la década de los 60s, desde entonces las computadoras digitales tomaron el control de la mayoría de las tareas; simples, repetitivas, tareas semiespecializadas y especializadas, marcando así una nueva era en la producción industrial.

Con la revolución de las computadoras digitales, se abrió paso a los dispositivos de control programables implementados en la automatización industrial, entre los cuales tenemos; los controladores lógicos programables PLC'S (*Programmable Logic Controllers*), los módulos de adquisición de datos FIELDPOINT y los circuitos integrados especializados denominados MICRO-CONTROLADORES, los anteriores dispositivos pueden ser utilizados en procesos de tipo discreto y en procesos de tipo análogo, dichos dispositivos se caracterizan por que permiten ser programados para tareas específicas, de modo que se obtenga el control esperado bien sea en la línea de producción, maquina o producto.

Actualmente debido a la explosión demográfica se ha hecho necesaria la producción en masa, lo cual conlleva a la automatización de los procesos industriales sin perder de vista el mejoramiento de la calidad de los productos; razón por la cual los dispositivos implementados en los sistemas de control deben ser cada vez más precisos, rápidos y robustos, estas características específicas de dichos dispositivos no son mencionadas por los fabricantes, por lo tanto en el presente artículo se compara las funcionalidades de tres diferentes dispositivos de control, por medio del posicionamiento angular de un péndulo invertido accionado hidráulicamente, todo esto con el fin de evaluar las fortalezas y debilidades de los dispositivos

existentes e implementados en un sistema de control de posición angular así como el realizado en la robótica industrial para determinar las posiciones articulares.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Controladores Lógicos Programables

El concepto de control es extraordinariamente amplio, abarcando desde un simple interruptor que gobierna el encendido de una bombilla o el grifo que regula el paso de agua en una tubería, hasta el más complejo ordenador o el piloto automático de una avión, se puede definir el control como la manipulación indirecta de las magnitudes de un sistema denominado planta a través de otro sistema llamado sistema de control.

Los primeros sistemas de control se desarrollaron con la revolución industrial de finales de siglo XIX y principios de siglo XX, al principio se basaron casi exclusivamente en componentes mecánicos y electromecánicos, pero a partir de los años cincuenta empezaron a emplearse los semiconductores, los cuales permitieron el mejoramiento del diseño de los sistemas [2].

Debido a la demanda de la industria de un sistema económico, robusto y flexible, hizo que se desarrollasen los autómatas programables industriales (PLC), los primeros autómatas pretendían sustituir a los sistemas convencionales con relés o circuitos lógicos, con la ventaja evidente que suponía tener un hardware estándar, los autómatas actuales han mejorado sus prestaciones respecto a los primeros en muchos aspectos, pero fundamentalmente a base de incorporar un juego de instrucciones más potentes, mejorar la velocidad de respuesta y dotar al autómata de capacidad de comunicación. Todo ello ha potenciado su aplicación masiva al control industrial [2].

2.2 Tiempo de Muestreo

La tasa o frecuencia de muestreo es el número de muestras por unidad de tiempo que se toman de una señal continua para producir una señal discreta, durante el proceso necesario para convertirla de señal analógica en señal digital [3].

El ingeniero sueco Harry Nyquist formuló el teorema fundamental para determinar la frecuencia de muestreo: “La frecuencia de muestreo mínima debe ser igual al doble de la frecuencia de la señal analógica que se pretenda digitalizar”, este teorema recibe también el nombre de “Condición de Nyquist” [4].

2.3 Microcontroladores

Es un circuito integrado programable que contiene todos los componentes de un computador. Se emplea para controlar el funcionamiento de una tarea determinada y, debido a su reducido tamaño, suele ir incorporado en el propio dispositivo al que gobierna. Esta última característica es la que le confiere la denominación de «controlador embebido» (embedded controller). En su memoria sólo reside un programa destinado a gobernar una aplicación determinada; sus líneas de entrada/salida soportan el conexionado de los sensores y actuadores del dispositivo a controlar, y todos los recursos complementarios disponibles tienen como única finalidad atender sus requerimientos. Una vez programado y configurado el microcontrolador solamente sirve para gobernar la tarea asignada.

La industria Informática acapara gran parte de los microcontroladores que se fabrican. Casi todos los periféricos del computador, desde el ratón o el teclado hasta la impresora, son regulados por el programa de un microcontrolador [5].

2.4 Péndulo

Péndulo, dispositivo formado por un objeto suspendido de un punto fijo y que oscila de un lado a otro bajo la influencia de la gravedad. Los péndulos se emplean en varios mecanismos, como por ejemplo algunos relojes.

En el péndulo más sencillo, el llamado péndulo simple, puede considerarse que toda la masa del dispositivo está concentrada en un punto del objeto oscilante, y dicho punto solo se mueve en un plano. El movimiento del péndulo de un reloj se aproxima bastante al de un péndulo simple. El péndulo esférico, en cambio, no está limitado a oscilar en un único plano, por lo que su movimiento es mucho más complejo.

El principio del péndulo fue descubierto por el físico y astrónomo italiano Galileo Galilei, quien estableció que el periodo de la oscilación de un péndulo de una longitud dada puede considerarse independiente de su amplitud, es decir, de la distancia máxima que se aleja el péndulo de la posición de equilibrio. (No obstante, cuando la amplitud es muy grande, el periodo del péndulo sí depende de ella). Galileo indicó las posibles aplicaciones de este fenómeno, llamado isocronismo, el cual permite determinar con precisión la aceleración local de la gravedad, ya que el movimiento del péndulo depende de la misma [6].

3. METODOLOGÍA

Para la evaluación de los sistemas de control se planteó una metodología previa constituida por tres etapas fundamentales (figura 1); la primera etapa contempla el desarrollo y análisis del prototipo virtual del péndulo junto con la construcción del mismo como plataforma de pruebas, la segunda etapa comprende la implementación del sistema electrónico y el montaje de los sistemas de control del péndulo, finalmente en la tercera etapa se lleva a cabo la integración de las etapas anteriores (etapa 1 y 2) presentado un dispositivo mecatrónico y las pruebas correspondientes, donde se evalúa de manera directa la funcionalidades de los sistemas de control.

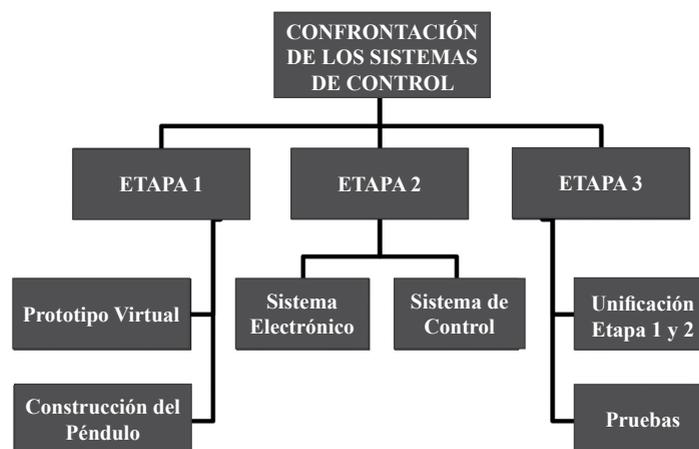


Figura 1. Etapas de desarrollo de la metodología.

3.1 Etapa 1

3.1.1 Prototipo virtual

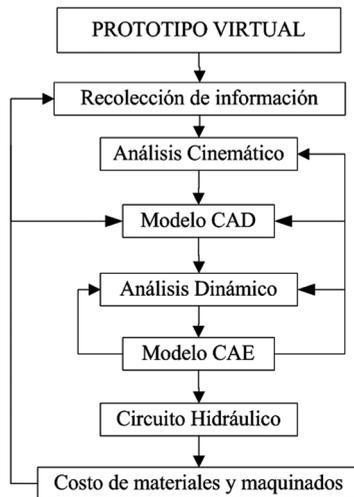


Figura 2. Prototipo virtual.

El diagrama de bloques de la Figura 2, permite dar un vistazo del proceso realizado para desarrollar el péndulo invertido; el “prototipo virtual” comprende varias fases, que tienen como fin obtener el modelo mecánico, la selección de los materiales, el montaje del circuito hidráulico y la relación de los costos del péndulo.

3.1.2 Construcción del péndulo

Con el prototipo virtual listo, se procede a construir el péndulo invertido teniendo en cuenta los siguientes pasos para su elaboración: compra de materiales, maquinado de piezas, soldaduras, acoples y fundición de placa de concreto.

3.2 Etapa 2

3.2.1 Sistema electrónico

En el módulo de electrónico se diseñó una interface de comunicación RS-232 que permite la transmisión de datos hacia el PC, además se implementó una fase de potencia para controlar el direccionamiento del péndulo.

3.2.2 Sistemas de control

En el módulo de control (Figura 3) se plantean tres opciones para controlar la posición del péndulo invertido, dichas opciones son: en la primera opción

se dispone un sistema SCADA (*Supervision Control and Data Acquisition System*) desarrollado en Labview®, un módulo de adquisición y procesamiento de datos denominado compac Field Point de National Instruments®, la segunda opción se compone de un sistema SCADA en Labview, un módulo de adquisición de datos Field Point y un sistema de procesamiento de datos con un PLC de la empresa Siemens® S7-300, y la tercera opción está compuesta de una interface visual en Matlab con una tarjeta electrónica de adquisición y procesamiento de datos como dispositivo de control.

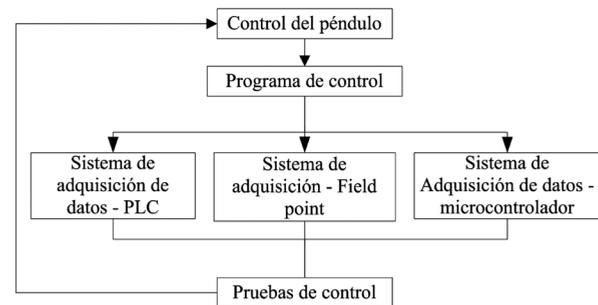


Figura 3. Sistemas de control.

Las variables que intervienen en el control son: el ángulo deseado (setpoint) y el ángulo sentido que se obtienen mediante un potenciómetro lineal acoplado al eje de giro del péndulo.

3.3 Etapa 3

3.3.1 Unificación de etapa 1 y 2

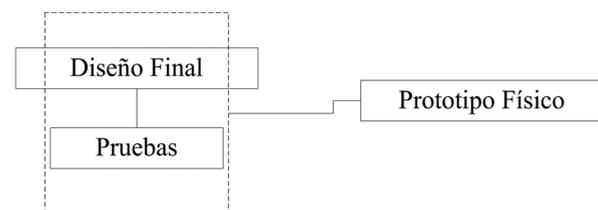


Figura 4. Prototipo físico.

El prototipo físico de la Figura (4) está conformado por la unificación de la etapa 1 con la etapa 2, es decir la fusión de la estructura mecánica con el sistema electrónico y el sistema de control.

3.3.2 Pruebas

A partir del prototipo físico se pone en marcha las pruebas, las cuales caracterizan el comportamiento del conjunto y a su vez facilitan la comparación de las ventajas y desventajas de un sistema de control con respecto del otro [7].

4. DESARROLLO

4.1 Prototipo Virtual

El diseño del prototipo virtual del péndulo invertido parte del análisis cinemático y dinámico, ya que estas variables estudian el comportamiento del modelo físico.

4.1.1 Análisis cinemático

El Análisis cinemático, comprende el estudio del movimiento del sistema, sin tener en cuenta sus causas obteniendo ecuaciones para determinar el desplazamiento, la velocidad angular y la aceleración angular del péndulo invertido [8], (Figura 5).

El diseño del péndulo se realizó a partir del análisis de las diferentes posiciones angulares, teniendo en cuenta como limitante la geometría del actuador hidráulico.

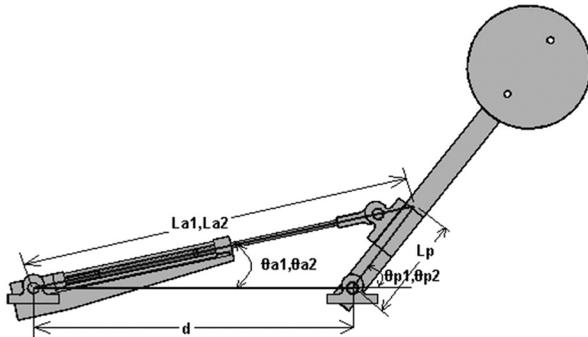


Figura 5. Distancias y longitudes del péndulo.

La posición del péndulo θ_p , se obtiene en relación al triángulo formado por la distancia del actuador L_a extendido y retraído con la barra del péndulo L_p . Ecuación (1).

$$\theta_{p2} = \pm \cos^{-1} \left(\frac{L_{a2}^2 - L_p^2 - d^2}{2dL_p} \right) \quad (1)$$

Posteriormente se plantean y se resuelven las ecuaciones de la cinemática tomando las longitudes correspondientes al péndulo y los ángulos que se forman entre sí, mediante la aplicación del método de Raven. (Figura 6). Ecuación (2).

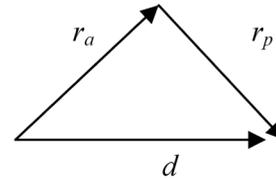


Figura 6. Triángulo de vectores del péndulo

$$\vec{d} + \vec{r} = \vec{r}_a \quad (2)$$

La derivación de la ecuación (2), permite la obtención de las velocidades. La velocidad angular del actuador se presenta en la ecuación (3).

$$w_a = \frac{\dot{L}_a \cos(\theta_a - \theta_p)}{L_a \sin(\theta_a - \theta_p)} \quad (3)$$

La velocidad angular del péndulo se presenta en la ecuación (4).

$$w_p = \frac{\dot{L}_a}{L_p \sin(\theta_p - \theta_a)} \quad (4)$$

Tomando la ecuación de la velocidad angular del péndulo y realizando su derivada se obtiene la Aceleración angular. Ecuación (5).

$$\alpha_p = \frac{L_a w_a^2 - w_p^2 L_p \cos(\theta_p - \theta_a)}{L_p \sin(\theta_p - \theta_a)} \quad (5)$$

4.1.2 Modelos CAD.

Se realizaron 6 modelos CAD que se evaluaron con la metodología del prototipo virtual, debido a las falencias que se encontraban en algunos de ellos se sometieron a modificaciones y rediseño de las piezas de los mismos, con base en ello se optó por un prototipo mecánico confiable delimitando el peso y los costos del mismo [9].

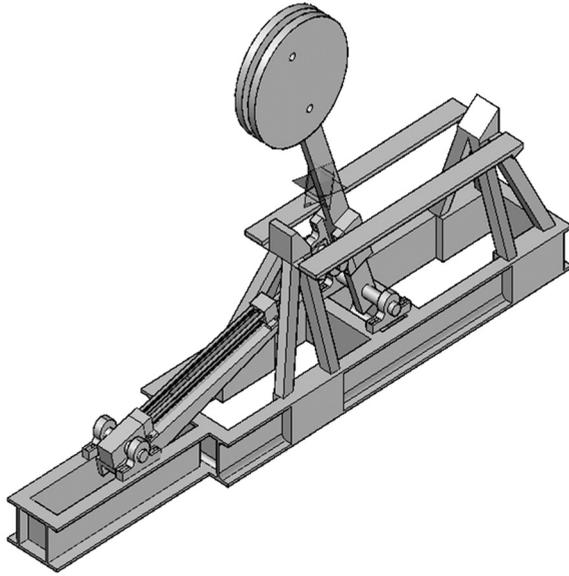


Figura 7. Péndulo invertido con base en perfil “C”

El diseño de la figura 7 corresponde al diseño final seleccionado luego de realizar los análisis CAD y CAE, la estructura se dimensionó luego de analizar cargas de impacto que podrían ser producidas por el choque de la barra del péndulo en la estructura; de acuerdo con los datos calculados fue necesario incluir soportes soldados sobre una base maciza, los cuales soportan los esfuerzos generados en caso de impacto, adicionalmente el diseño brindo ventajas al reducir la cantidad de materiales utilizados conservando la rigidez de la estructura el peso de la base es de 150 kg el cual es menor con respecto de los anteriores prototipos virtuales, reduciendo a su vez el costo de materiales para su construcción.

4.1.3 Análisis dinámico

En la fase del Análisis dinámico, se estudian las causas que generan el movimiento determinando las fuerzas aplicadas al péndulo y las cargas inerciales [8].

El análisis dinámico parte del análisis cinemático previo, obteniendo como resultado las cargas y reacciones necesarias para cumplir las condiciones cinemáticas.

Se plantea la ecuación que rige el sistema con base en la figura 8, determinando las cargas mediante el modelo de Newton – Euler, haciendo sumatoria de momentos en el eje de rotación del péndulo [10]. El resultado de análisis dinámico se resume en las ecuaciones 6 y 7 que posteriormente se validaron con los datos de presión del sistema hidráulico.

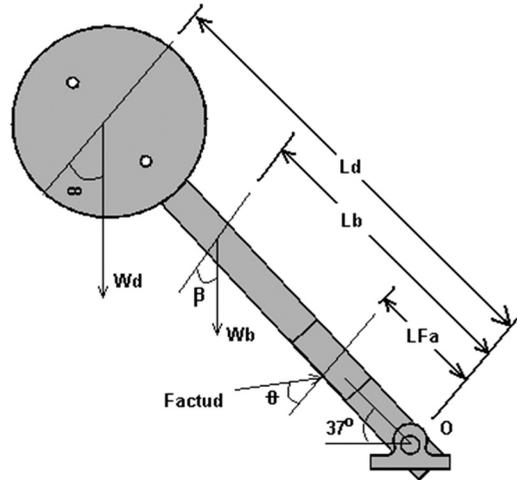


Figura 8. Distribución de cargas del péndulo

$$\sum m_o = I_{totalpend} * \alpha \tag{6}$$

$$\sum m_o = -F_{actud} * \cos(\theta) * LF_a + Wb * \cos(\beta) * (L_b) + Wd * \cos(\infty) * (L_d) \tag{7}$$

4.1.4 Resistencia de materiales

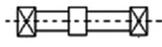
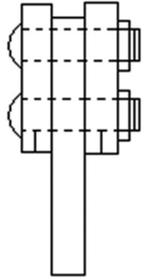
Los análisis de resistencia de las piezas se evaluaron de dos maneras, mediante la simulación con el software de elementos finitos (ANSYS WB ®), y con base en modelos teóricos clásicos [11], el modelo CAE fue utilizado para el análisis de impacto.

Análisis teórico

El péndulo se analizó parte por parte teniendo en cuenta las condiciones de carga obtenidas en el modelo dinámico comprobadas en las pruebas realizadas en con el sistema hidráulico, con las cargas y materiales a utilizar se obtienen los factores de seguridad presentados en la tabla (1) dichos factores de seguridad fueron obtenidos para cada una de las piezas que componen el sistema.

Tabla 1. Factores de seguridad de las piezas del péndulo.

CAD	NOMBRE DE PIEZA	FACTOR DE SEGURIDAD
	BARRA DEL PENDULO	$N_s = 9,5$

CAD	NOMBRE DE PIEZA	FACTOR DE SEGURIDAD
	EJE DEL PÉNDULO	$N_s = 7,2$
	PERNOS DE LOS DISCOS DEL PÉNDULO	$N_s = 43$

Análisis CAE

En la fase de la Análisis CAE, se determinan virtualmente los esfuerzos, deformaciones y factores de seguridad que intervienen en cada una de las piezas utilizadas en el péndulo invertido, y con base en esa información se realiza la selección de los materiales. Como parte del diseño del péndulo invertido se simulo el soporte de seguridad (Figura 9) capaz de resistir una carga de 40 Toneladas estimada como impacto generado por la barra del péndulo o por el sistema mecánico; el cabezal utilizado en la construcción final fue realizado con un cilindro macizo de 4" de diámetro, el cual descansa sobre unas barras diagonales que sirven de soporte; el ángulo del cabezal del primer soporte es de 53°, el segundo soporte consta de un cabezal maquinado a 37°, con la misma configuración de apoyos que el primero.

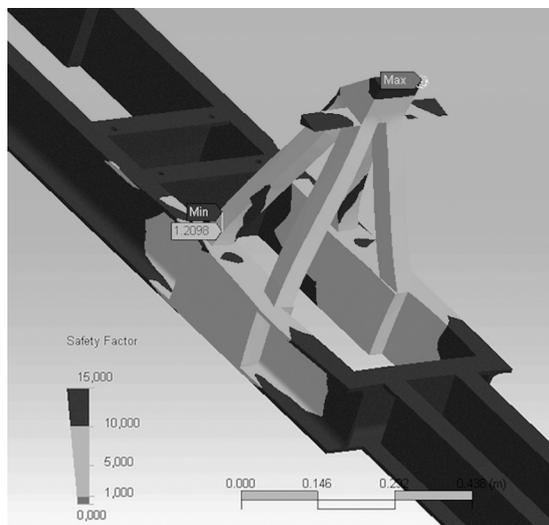


Figura 9. Simulación CAE de la base y los soportes de seguridad.

La base es la estructura donde se apoya el péndulo y los soportes de seguridad, su función es: resistir la carga de impacto y el peso de los mecanismos que lo componen (Figura 9). La base está diseñada en un perfil estructural tipo "C", de dimensiones 15x54x8.7mm que se encuentra reforzado por 8 cajuelas empotradas de acero estructural.

4.1.5 Circuito hidráulico

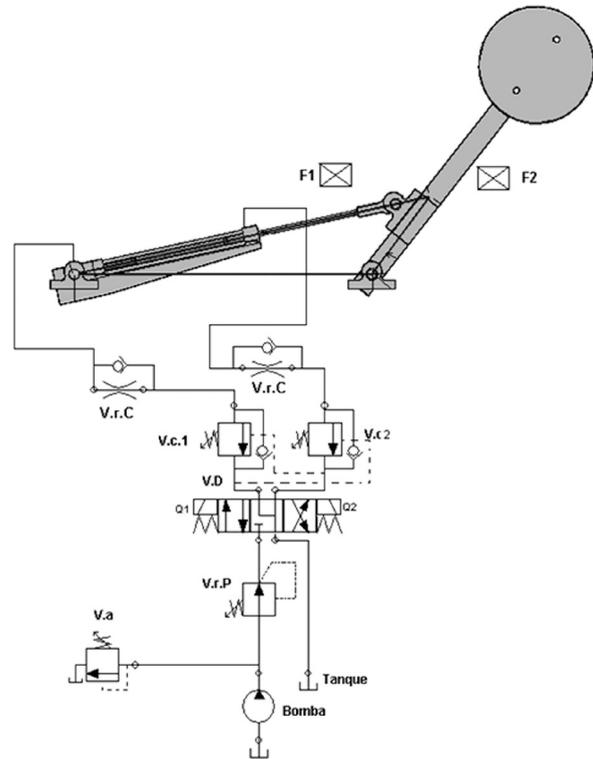


Figura 10. Circuito hidráulico.

El movimiento angular del péndulo está en el intervalo entre 37° y 153°, para la generación de este movimiento se implementó un circuito hidráulico (Figura 10), el cual facilita el manejo de la carga, transformando el movimiento lineal del actuador en un movimiento angular del péndulo, durante la rotación del mismo se presentan cargas que se oponen al movimiento o cargas que acompañan el movimiento, la dirección de dichas cargas depende del ángulo formado por el péndulo, para contrarrestar este comportamiento se implementaron dos válvulas contrabalance (V.c) que controlan el sostenimiento de carga en cualquier dirección.

Un factor importante a considerar en la estimación de la resistencia de los elementos del modelo mecánico, fue la velocidad del actuador la cual se ve afectada por

la oscilación del péndulo, pues para ángulos mayores a 90° se generan cargas positivas en el vástago, las cuales a su vez crean vacíos que pueden originar cavitación en los elementos del circuito, a fin de minimizar dicho problema se utilizaron las válvulas reguladoras de caudal (V.r.C) encargadas de controlar la velocidad de desplazamiento del vástago del actuador.

4.2 Construcción del Péndulo

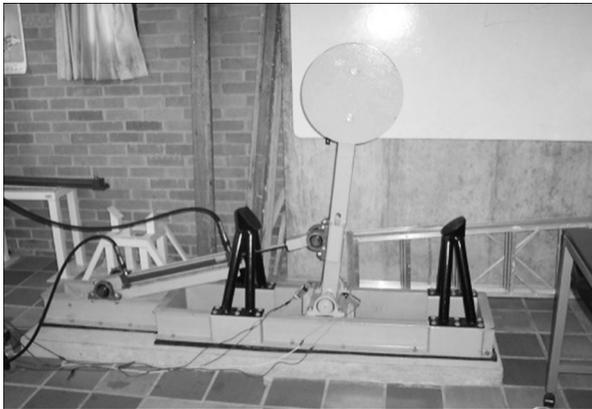


Figura 11. Construcción del péndulo invertido.

Con el prototipo virtual puesto a punto se procede a culminar la etapa del diseño mecánico seleccionando los materiales finales y utilizándolos para la construcción del sistema obteniendo como resultado el péndulo presentado en la Figura 11. Para obtener un acabado final adecuado y disminuir los efectos de la corrosión se aplicó un tratamiento de galvanizado [9] a las piezas expuestas.

4.3 Sistema Electrónico

La etapa de control del péndulo requiere la implementación de un circuito de potencia (Figura 12), encargado de la alimentación de las bobinas de la válvula direccional; dichas bobinas constan de una resistencia de 19Ω , requiriendo de una tensión de 24V y corriente de 1.26 Amperios.

Esta etapa de potencia funciona como acople eléctrico y protección para las tarjetas de adquisición de datos, por consiguiente se implementa un circuito de potencia mediante la cual se asegura la provisión de corriente requerida por las bobinas.

RIGAN ARBEY ARCHILA TORRES,
JOHN FABER ARCHILA DIAZ,
JAVIER MAURICIO CASTELLANOS

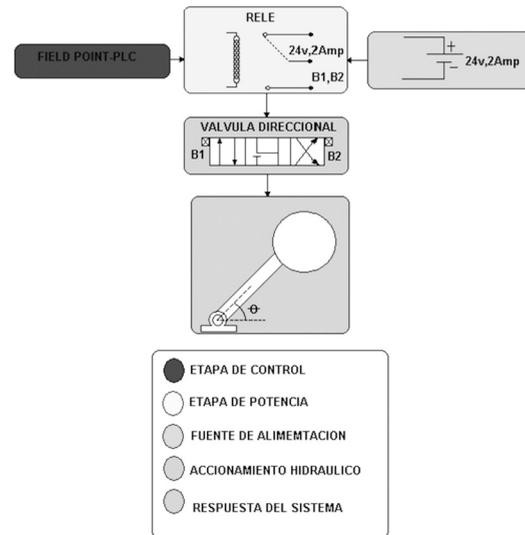


Figura 12. Diagrama de flujo del módulo de potencia.

4.3.1 Tarjeta de adquisición de datos

En el desarrollo de la etapa de electrónica se implementó una tarjeta de adquisición y procesamiento de datos (Figura 13), la cual consta de un sistema de comunicación serial RS-232 que permite enviar y recibir la información al computador (PC) para posteriormente ser graficados; la señal recibida por el PC es la tensión digitalizada por el PIC, este voltaje es suministrado por un potenciómetro lineal de $10k\Omega$, que permite tener una salida de voltaje que es proporcional al ángulo del péndulo, este sensor de posición es alimentado a una tensión de 5v la cual varía a medida que el péndulo rota, esta señal es enviada al PIC 16F877 que es el encargado de digitalizar el voltaje análogo, ya que consta de un convertor ADC de 10bits, este valor digitalizado es enviado al puerto serial RS-232 a través de un MAX 232 el cual permite elevar y acondicionar los voltajes para posteriormente ser interpretarlos por el PC.

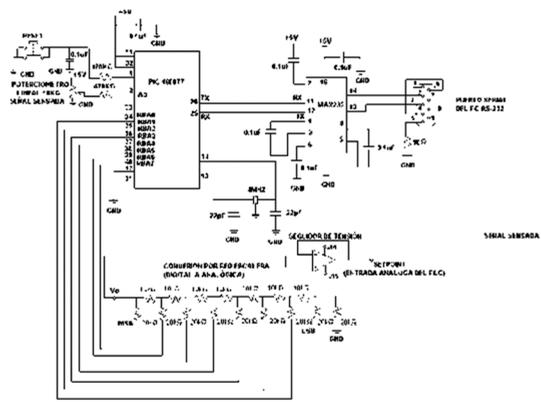


Figura 13. Tarjeta de adquisición de datos.

4.4. Sistemas de Control

El módulo de control tiene como función posicionar el péndulo en la ubicación angular deseada por el usuario, esto es posible porque cuantifica el error comparando los valores de la variable sensada con la deseada, si dicho error esta por fuera del valor buscado, se toma las medidas correctivas para disminuirlo hasta el umbral deseado [12].

El módulo control está comprendido por tres fases de adquisición y procesamiento de datos: los módulos de Field Point, el PLC y tarjeta electrónica de adquisición de datos, permiten la recepción, envío y tratamiento de las señales que intervienen en el posicionamiento del prototipo físico del péndulo [13].

4.4.1 Interface visual en Labview®

En el control del péndulo se implementaron dos programas en Labview®, en el primer programa los módulos de field point se ocupan del acondicionamiento de la señal, el PC es el encargado de la toma de decisiones y el procesamiento datos a través de un instrumento virtual.

En el segundo programa se divide el proceso de control de la siguiente manera; la señal del setpoint es enviada a través de los módulos de field point que están enlazados con el PLC S7-300, que se encarga del procesamiento de datos y toma de decisiones, finalmente se grafica la respuesta del sistema a través de la interface visual (Figura 14).

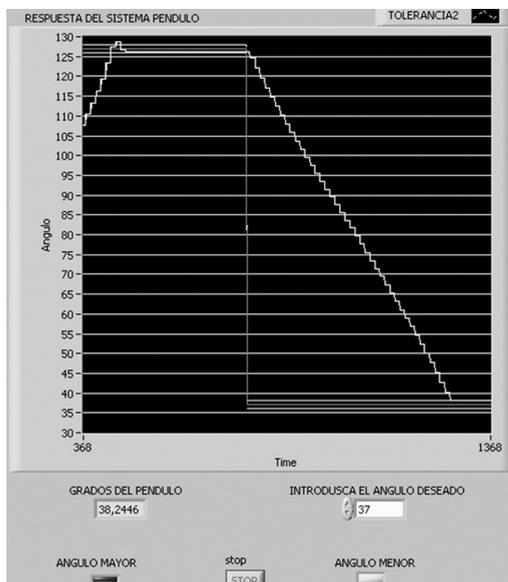


Figura 14. La interface gráfica de Labview®

Labview consta de una interface visual donde se grafica: la señal del Sensor que corresponde a la respuesta del sistema ante una señal escalón, la posición angular deseada (setpoint) y dos franjas paralelas que corresponden al umbral. El instrumento virtual consta de un visualizador digital que representa los valores que se van obteniendo del ángulo sensado en tiempo real.

En la interface visual el usuario fija el setpoint en la casilla “Introduzca el ángulo deseado”, este valor no debe exceder ni ser inferior al rango permitido para el posicionamiento del péndulo, porque puede ocasionar un daño en el vástago del actuador, debido a lo anterior se programo el indicador para que trabaje en el rango indicado el cual está comprendido entre (37° a 127°), además se agregaron dos iconos con lógica booleana que indican si la posición del péndulo es menor o mayor que el setpoint, y a su vez indica el estado de las bobinas de la válvula direccional, es decir, el icono encenderá indicando que la bobina de la válvula direccional esta activa.

4.4.2 Interface visual de Matlab

Se diseño una GUI (Interface grafica de usuario) en el programa MATLAB® (Figura 15), que consta de una interface visual la cual permite graficar el ángulo sensado, el ángulo deseado y el umbral de tolerancia.

Esta interface está constituida por un plano, siendo las ordenadas el ángulo del péndulo invertido y las abscisas es el tiempo de muestreo, asimismo contiene una casilla donde se digita el setpoint y dos botones donde se da el inicio del programa o el cierre del mismo respectivamente.

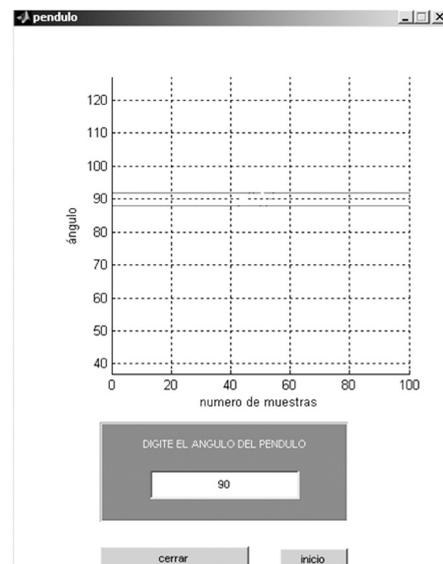


Figura 15. Interface gráfica de MATLAB®

4.5 Pruebas

Como se observa en la figura 16 se detalla la fusión del prototipo virtual, el sistema electrónico y el sistema de control, dicha fusión conforma el prototipo físico, el cual se encuentra listo para realizar la realización de las pruebas [14].



Figura 16. Unificación de etapas 1 y 2 [15]

4.5.1 Comparación de los sistemas de control

A partir de la unificación de las etapas se procede a evaluar las ventajas y desventajas de los dispositivos de control, por lo tanto se analiza en detalle la respuesta del péndulo en cuanto a su tiempo de muestreo, procesamiento de datos y resolución del convertidor ADC [16], estas magnitudes se cuantifican en la tabla 2 presentando la respuesta de cada sistema de control. Es importante resaltar que los datos que se presentan en la tabla no son datos que presenten los fabricantes e influyen trascendentalmente en la correcta selección del dispositivo de control.

Tabla 2. Respuestas de los sistemas de control.

Elemento utilizado	PIC 16F877	PLC S-300	Field Point
Rango del péndulo °	90 (37°-127°)	90	90
Rango de valores digitalizados "vd"	341.33	5712	1482
Resolución %vd	0.2636	0.01575	0.060
Oscilación en valores digitalizados "vd"	11	16	13
Grado de error en la posición del péndulo °	2.89	0.252	0.78

4.5.2 Señales de respuesta de Labview con Field Point

Para controlar la posición angular del péndulo se implementaron tres sistemas, el primer sistema está compuesto por una interface visual en LABVIEW® que se encarga del procesamiento de la información, dicha información es acondicionada por un modulo de adquisición de datos FIELD POINT, el cual se encarga de sensar la posición angular del péndulo y a su vez de accionar el sistema hidráulico para posicionar el péndulo de acuerdo con el setpoint.

En la Figura 17 se muestra la señal de respuesta del primer sistema de control, en la cual se observa que el péndulo invertido sobrepasa el umbral del setpoint, esto ocasiona que el mecanismo gire en sentido contrario para que se estabilice rápidamente dentro del rango de tolerancia de la posición deseada [17], lo anterior se debe a la resolución del modulo de adquisición de datos y a un retardo en el procesamiento de la información en el PC.

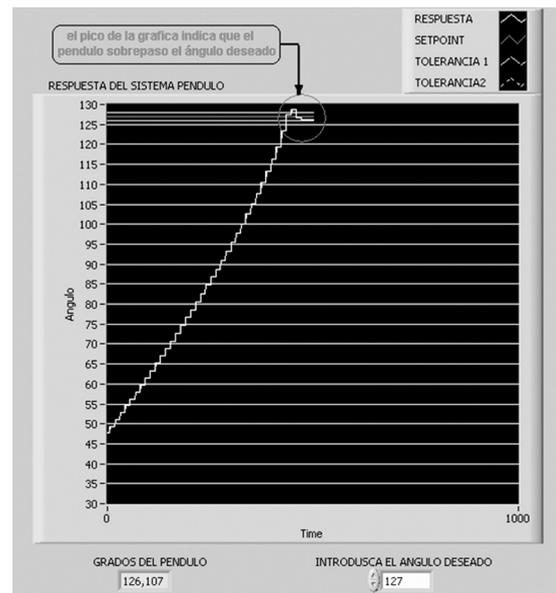


Figura 17. Primera respuesta de control con LABVIEW.

4.5.3 Señales de respuesta de Field Point con el PLC

El segundo sistema de control está integrado por: una interface visual en Labview, la cual tiene como función graficar el posicionamiento angular del péndulo, dicha interface se encarga de la recepción y transmisión del valor del setpoint a los módulos de adquisición de datos Field Point, que estos a su vez envía esta señal al PLC para el procesamiento de datos y toma de decisiones.

En la (Figura 18) se observa la respuesta del sistema de control del PLC, tiene un grado de error muy pequeño de $\pm 0.3^\circ$ con el ángulo deseado, que se comprueba en las graficas de respuesta del sistema, esta rápida respuesta es debido a la resolución del conversor ADC del PLC y consta de un procesador independiente para la evaluación de los datos y toma de decisiones.

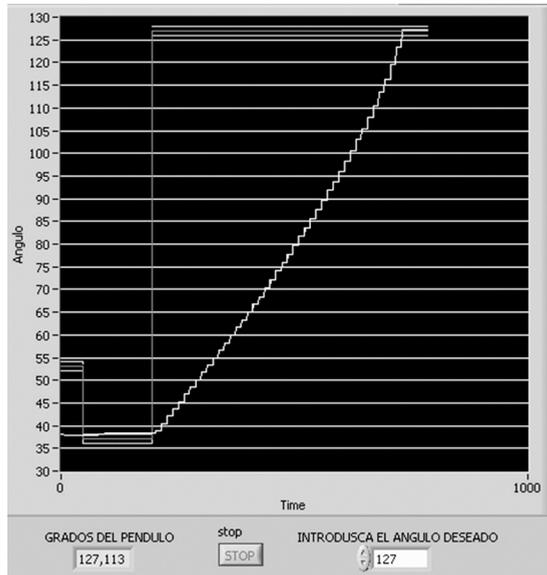


Figura 18. Respuesta de control del PLC con Labview.

El muestreo del PLC es casi instantáneo comparado con lo que ocurre en la primera etapa, que el tiempo de respuesta es lento causando tolerancias mínimas de un 1° de error que no son aceptables en el control del péndulo.

Con base en la tabla 2 que corresponde al mínimo grado de error del péndulo, y también al análisis de las graficas anteriormente descritas se opto por elegir el sistema de control con el PLC del péndulo invertido, ya que consta de una precisión más alta debido a su rápido proceso de datos [16].

4.5.4 Señal de respuesta de Matlab con la tarjeta electrónica

Enlazadas las dos etapas (MATLAB-tarjeta de adquisición de datos) se procedió a visualizar los datos sensados, es decir, la posición en que se encuentra el péndulo en el transcurso del tiempo, en la Figura 19 se observa que el péndulo se posicionaba con un grado de error con respecto al ángulo deseado, por tal motivo se concluyo que el rango del conversor ADC de 10

bits de 1024 posibles valores digitalizados, que posee internamente es muy pequeño, lo cual ocasiona que sea vulnerable a pequeños cambios de voltaje, por lo tanto las oscilaciones de 11 bits se ven reflejadas en el aumento de la tolerancia del ángulo de posicionamiento del péndulo, es decir, el posible grado de error corresponde a $\pm 2.8^\circ$.

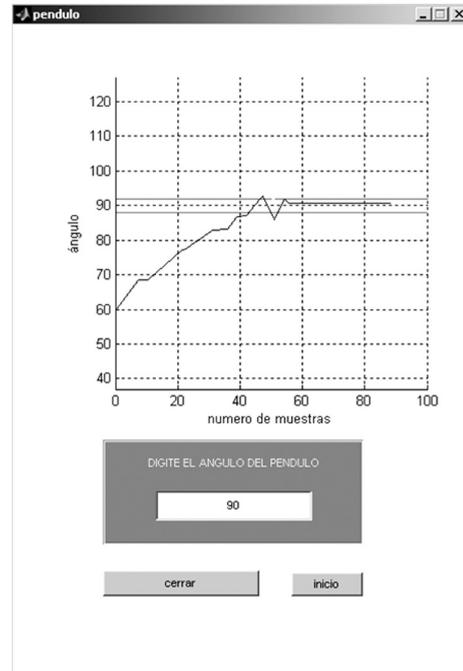


Figura 19. Respuesta de control de MATLAB con la tarjeta electrónica.

5. CONCLUSIONES

El prototipo final funciona en los ángulos para los que fue diseñado sin ninguna interferencia.

Se comprobaron los valores obtenidos por las ecuaciones dinámicas con la lectura de un manómetro de presión ubicado en el sistema hidráulico, la diferencia mayor entre las lecturas manométricas y el modelo dinámico fue de 0.02 bar.

Se concluyó que el PLC es el dispositivo más adecuado para controles que requieren una respuesta rápida, por que consta de un procesador de datos independiente y un conversor ADC de 16bits.

Se determinó que labview es un software muy bueno en el diseño de las interfaces graficas, y además esto en conjunto con los field point conforma un adecuado

sistema de supervisión y de control para sistemas de respuesta lenta.

Se estableció la tolerancia de error del ángulo deseado: $\pm 0.254^\circ$ para el PLC, $\pm 2.8^\circ$ para la tarjeta del microcontrolador y $\pm 0.8^\circ$ para labview, por lo tanto se concluye que el PLC es el elemento más preciso para la posición angular del péndulo.

Se concluyó que los programas CAD-CAE utilizados para el diseño y la simulación de estructuras, son la base para desarrollar sistemas mecánicos, teniendo presente que permiten la elaboración de prototipos virtuales cuantas veces sea necesario, por lo cual es más posible evaluar diferentes opciones y seleccionar la mejor alternativa.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la VIE de la UIS, por el apoyo y financiación brindado al proyecto titulado «estudio y diseño conceptual de una ayuda técnica exoesqueleto» código 5546, de donde surge el presente artículo de investigación.

7. REFERENCIAS

- [1] A. Barrientos, R. Aracil, Fundamentos de Robotica, McGraw-Hill, Primera edición, España 1997, pp 2 – 10.
- [2] J. Balcells, J. Romeral, Automatas Programables, Primera edición, 1997, pp 3 – 10.
- [3] J. O. Smith, Mathematics of the Discrete Fourier Transform (DFT), Second Edition, 2007, pag 139-168.
- [4] O. Okatsiuhiko, Sistema de control en tiempo discreto, 2 edición, Prentice hall, 1996, pp 10-40.
- [5] J. U. Angulo, I. M. Angulo, Microcontroladores Pic, tercera edición, McGRAW-HILL, 2003, p 1.
- [6] J. D. Wilson, A. J. Buffa, Fisica, quinta edición, Pearson, 2003, pp 225-230.
- [7] H. L. Paul, C. Yang, Sistemas de Control en Ingenieria, Editorial pearson educacion. 1999, pp 4-35.
- [8] P. B. Ferdinand, E. Russell, Mecánica vectorial para ingenieros dinamica, sexta edicion, Mc Graw

Hill, 2000, pp. 597-814

- [9] L. M. Robert P.E. Diseño de Elementos de Maquinas segund Edición. Editorial Prentice Hall. 1992, pp 230-300.
- [10] P. B. Ferdinand, E. Russell, Mecánica de materiales, tercera edición, Mc Graw Hill, 2002, pp. 30-47.
- [11] P. B. Ferdinand, E. Russell, Mecánica vectorial para ingenieros Estatica, sexta edicion, Mc Graw Hill, 1999, pp. 205-236.
- [12] O. Katsiuhiko, Ingeniería de Control Moderno, tercera edición, Pearson, 1998, pp 69-76
- [13] D. S. Mills, The physical pendulum: A computer-augmented laboratory exercise. Am. J. Phys. 48 (4) April 1980, pp. 314-316.
- [14] J. A. F. Gordillo, El péndulo invertido un desafío para el control no lineal, revista iberoamericana de automática e informática industrial, vol 2, N.2, abril 2005, pp 8-19.
- [15] R. A. T. Archila, Diseño Y Construcción De Un Péndulo Invertido. [Trabajo de grado]. Universidad Autónoma de Bucaramanga (UNAB), 2006.
- [16] A. R. Tello, E. A. F. Vela, Control de la posición de una bola sobre una barra basculante, pamplona Spain. septiembre de 1998, seminario anual de automática, electrónica industrial e instrumentación, (SAAEI 98), pp. 43-46.
- [17] H. Kent, J. Lundberg, K. Roberge, Classical Dual-Inverted-Pendulum Control, Massachusetts Institute of Technology Cambridge presented at the 2003 ieee,, conference on decision and control, MA 02139, pp 4399-4404.

8. CURRÍCULUM



Reagan Arbey Archila Torres.
Ingeniero Mecatrónico de la universidad Autonomas de Bucaramanga, Colombia.
Áreas de Trabajo: Diseño de Maquinas, Automatización, Hidráulica y control.
reagan_arbey@hotmail.com



John Faber Archila Díaz. Ingeniero Mecánico de la universidad Industrial de Santander, Colombia, Especialista en Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Industrial de Santander, Magíster en Ingeniería Mecánica

área diseño de maquinas y robótica, de la Universidad Federal de Rio de Janeiro Brasil, actualmente profesor Investigador de la Universidad industrial de Santander UIS Colombia. Áreas de Trabajo: Robótica Industrial, Diseño de Maquinas, Diseño Mecatrónico, Automatización, Hidráulica y control. Jfarchid@uis.edu.co



Javier Mauricio Castellanos Olarte. Ingeniero Mecánico Universidad Industrial de Santander, Máster en Ciencias Térmicas y Energía, Escuela Central de Lyon, Profesor Asociado de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga.

Áreas de trabajo Simulación y Modelamiento Computacional, Estudio y desarrollo de equipo térmico, Maquinas de Combustión Interna Alternativas.