



NUEVAS REALIDADES PARA LA EDUCACIÓN EN INGENIERÍA:
CURRÍCULO, TECNOLOGÍA, MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

13 - 16
DE SEPTIEMBRE

2022

CARTAGENA DE INDIAS,
COLOMBIA



Prototipo de planta mecatrónica reconfigurable para la enseñanza y aprendizaje del control automático

Fabián Rolando Jiménez López

**Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Colombia**

Resumen

Este trabajo presenta el diseño, implementación, instrumentación, modelado y control de un prototipo de planta mecatrónica reconfigurable para el estudio de control automático. Este sistema mecatrónico se dispuso para tres tipos de configuraciones de plantas: bola y viga, balancín con hélice y bicóptero. Su comportamiento dinámico ha servido para ilustrar conceptos fundamentales de estabilidad, dinámica no lineal y teoría de control moderna. El modelo dinámico no lineal del sistema se obtuvo utilizando ecuaciones de Newton de torque e inercia, se linealizó, se representó como función de transferencia y en el espacio de estados. El sistema se construyó e instrumentó utilizando como unidad de control el microcontrolador PIC18f4550 que sirvió también como sistema de adquisición y distribución de señales para identificar el modelo del sistema experimentalmente. Se diseñaron y simularon controladores PID mediante sintonización y se evaluó el desempeño de los mismos, utilizando las herramientas del software LabVIEW™ y Matlab® integradas a la plataforma. El desarrollo de este prototipo de bajo costo sirvió como apoyo para el aprendizaje y aplicación de conceptos de la teoría de control por parte de los estudiantes y se aprovechó como aporte significativo para la planeación del curso de control bajo la metodología de aprendizaje basado en proyectos.

Palabras clave: control automático; planta de laboratorio; educación en ingeniería electrónica, aprendizaje basado en proyectos

Abstract

This work presents the design, construction, instrumentation, modeling and control of a reconfigurable mechatronics plant prototype for the automatic control study. This mechatronic system was arranged for three types of plant configurations: ball and beam, swing with propeller and bicopter. Its dynamic behavior has served to illustrate fundamental concepts of stability, nonlinear dynamics and modern control theory. The non-linear dynamic model of the system was obtained using the Newton's equations of Torque and Inertia, the model was linearized and represented as a transfer function and in the state space. The system was constructed and instrumented using the PIC18f4550 microcontroller as a control unit, which also served as signal acquisition and distribution system, used to identify the model of the system experimentally. PID controllers were designed and simulated by tuning and their performance was evaluated, using the LabVIEW™ and Matlab® software tools integrated over the platform. The development of this low-cost prototype served as support for the learning and application of control theory concepts by students and was used as a significant contribution to the of the control course under the Project-Based Learning methodology.

Keywords: *automatic control; laboratory plant; electronic engineering education; problem based learning*

1. Introducción

Los cursos de control automático son de gran importancia en la formación de profesionales en Ingeniería Electrónica, Mecánica y Aeroespacial, entre otras, ya que su conceptualización brinda a los estudiantes herramientas cognitivas e instrumentales para aportar desarrollos tecnológicos y aplicaciones en diversos sectores productivos como el industrial, aeronáutico, del transporte, agrícola, salud, militar, comercial entre otros (Pérez, 2008). Esta área de estudio de la ingeniería aplica métodos y algoritmos matemáticos que permiten resolver problemas prácticos con enorme impacto social en los sectores mencionados. Diversos estudios se han enfocado en mejorar los procesos de enseñanza aprendizaje en la ingeniería de control, destacándose Luwosky (2002), que describe cómo el aprendizaje basado en proyectos (PBL – Project Based Learning) junto con el uso de herramientas de computo pueden mejorar los procesos de aprendizaje en el estudio de sistemas de control e instrumentación.

Así mismo, Fernández (2012) resalta que “*Los ingenieros que se enfocan en control deben formular soluciones generales para los problemas de control; la educación en control debe proveer un entorno de aprendizaje que motive el desarrollo de diferentes habilidades*”. De lo anterior, se puede establecer que el aprendizaje del área de control no solo se fundamenta en teorías matemáticas, sino también en la implementación real de prototipos y plantas, que recreen los casos de control encontrados en la industria y de esta manera, brindar al futuro ingeniero herramientas para aplicar estrategias de control en sistemas reales (Rodríguez, 2014).

Los desarrollos utilizados para que el estudiante adquiriera el conocimiento de la teoría y práctica del control automático, son diversos, desde plantas prototipo hasta entornos virtuales que en general, hacen uso de metodologías activas de aprendizaje para el estudio y aplicación de la ingenie-



ría de control (Yuan, 2012). Investigaciones previas han demostrado que el enfoque pedagógico PBL, aprendizaje colaborativo y cooperativo, sumado al uso de herramientas tecnológicas en los cursos de control favorecen el aprendizaje de los estudiantes de ingeniería, mejorando la retención de conceptos aplicados, promoviendo la iniciativa e incrementando su motivación, mediante la resolución de problemas donde se aplican los conocimientos a situaciones específicas (Jayaram, 2013).

Los métodos de aprendizaje centrados en el estudiante, involucran al alumno de forma activa como protagonista de su formación académica mediante gran variedad de enfoques, dentro de las cuales se destaca el trabajo colaborativo o cooperativo en grupos pequeños de estudiantes donde se abordan proyectos o desafíos que implica el desarrollo de competencias cognitivas y prácticas (Miranda, 2019; Mao, 2017). Pero para ello se requiere de herramientas tecnológicas como plantas de proceso donde los estudiantes puedan desarrollar sus prácticas, las cuales, en algunas instituciones no están disponibles, y donde los estudiantes o profesores tienen que invertir tiempo considerable en su diseño, construcción, instrumentación, puesta a punto y obtención del modelo matemático y experimental, muchas veces sin tener suficiencia en el diseño o construcción de prototipos.

Los programas de Ingeniería Electrónica, principalmente públicas, muchas veces no cuentan con los recursos económicos para adquirir prototipos o herramientas que favorecen el aprendizaje del control automático, ya que estas plantas pueden llegar a ser demasiado costosas (Apkarian, 2012). Dada esta situación, la tendencia en muchos programas propende por desarrollar plantas prototipo de bajo costo, que favorezcan el estudio de la teoría de control para los estudiantes, donde el tiempo dedicado en la construcción de prototipos se dedique en forma efectiva en la identificación de modelos, el diseño y simulación de estrategias de control, su implementación sobre la planta y la verificación del desempeño de los algoritmos implementados (Jiménez, 2015; Jiménez, 2016, Ruge, 2017; Jiménez, 2020).

El documento se estructuró de la siguiente manera: la sección 2. resume la descripción, diseño, construcción e instrumentación del Prototipo Mecatrónico reconfigurable. En la sección 3. se discute la obtención del modelo matemático de la planta mecatrónica en sus diferentes configuraciones, bola y viga, balancín y bicóptero. La sección 4 establece como se aplicó el enfoque PBL en un curso de control durante dos semestres en el año 2019 articulado a los objetivos de aprendizaje, y seguidamente en la sección 5 se discuten los resultados obtenidos donde se valida el prototipo implementado mediante identificación del modelo, el diseño de controladores, su implementación y logros obtenidos por los estudiantes. Para finalizar se extraen las conclusiones del ejercicio académico desarrollado.

2. Prototipo Mecatrónico Reconfigurable

2.1. Descripción Estructura Mecánica del Prototipo

La plataforma mecánica del prototipo reconfigurable comprendió dos sistemas: el sistema de *soporte y acople* y el sistema de *balance y hélices*. La estructura del sistema de soporte y acople se construyó con material acrílico, teflón, bronce y aluminio, diseñado utilizando el software de dise-



ño Solid Works®, teniendo en consideración aspectos como piezas modulares de fácil acople, que fueron impresas mediante una impresora 3D.

El sistema de soporte y acoplamiento contiene las partes mecánicas del prototipo mecatrónico, que, junto con los dispositivos electrónicos y electrónicos, hacen posible el movimiento de los diferentes grados de libertad del sistema y su control. La estructura mecánica diseñada, partes constitutivas, despiece y montaje real se ilustra en la Figura 1.

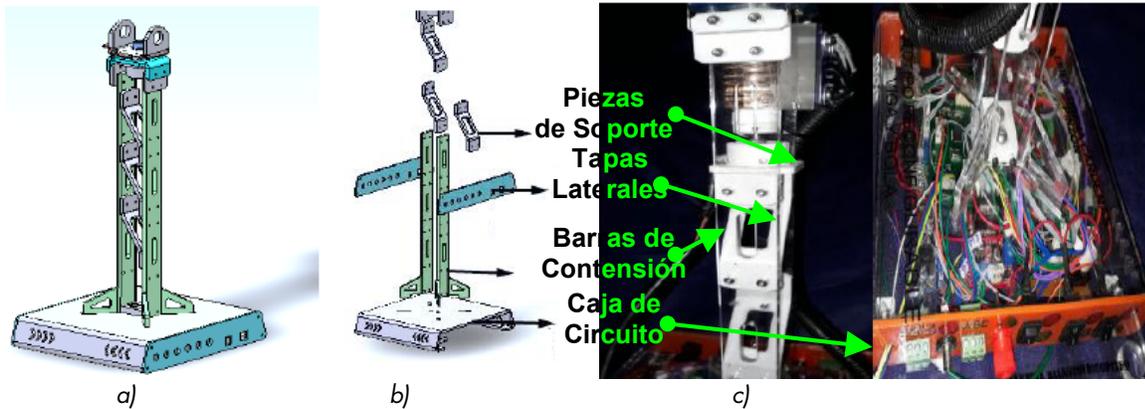


Figura 1. a) Ensamblaje del diseño de la estructura. b) Despiece del diseño. c) Montaje real.

Las tapas laterales del sistema de soporte se adecuan para acceder a los terminales de conexión del circuito electrónico de control, las piezas de soporte fueron grabadas en impresión 3D y permiten que las barras de contención estén acopladas entre sí. Para acoplar la estructura del soporte con el eje de la barra del sistema de balance y de hélices, se diseñó una articulación mecánica como la mostrada en la Figura 2:

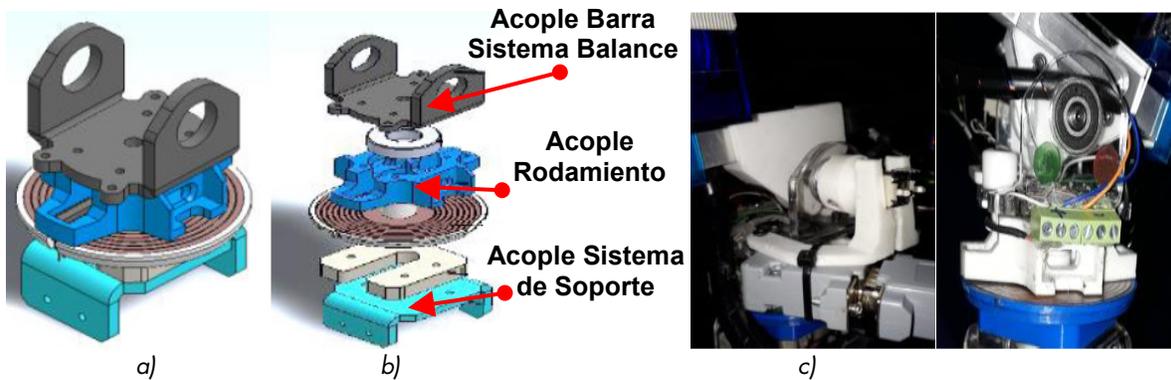


Figura 2. Diseño del acople. b) Despiece del diseño del acople. c) Acople real montado.

En la Figura 3 se muestra el diseño del soporte para los motores de las hélices en el sistema de balance y hélices. En este acople se ensambla cada motor de las hélices y en acrílico de color naranja se une el acople del eje de dos motores con el protector de la hélice conformando el conjunto completo, que es completamente extraíble y desarmable.

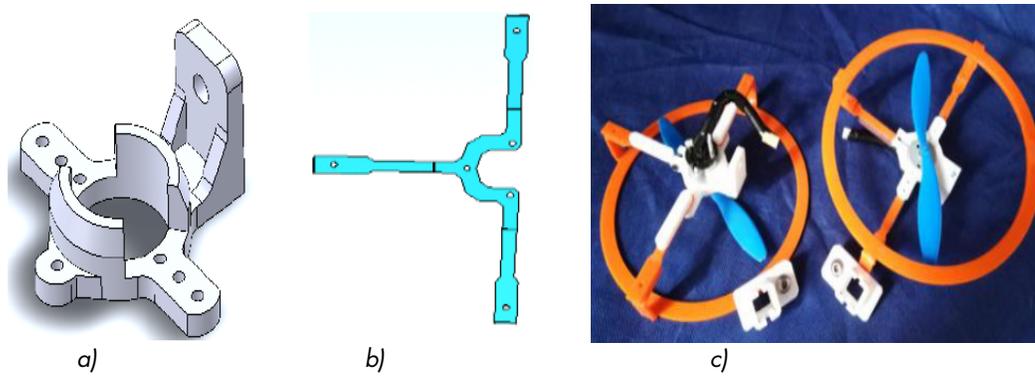


Figura 3. a) Diseño acople motor hélices. b) Diseño de unión entre acople de motor y protector de hélice. c) Estructura módulo de acople de hélice implementado.

2.2. Descripción Componente ElectroMecánico del Prototipo

La conectividad en el prototipo se implementó sobre un sistema de escobillas con colector que concentra las diferentes señales de actuación de la planta, con el propósito de evitar daño en el cableado cuando se produzca un giro del sistema y de esta manera conmutar en las diferentes configuraciones de planta como se observa en la Figura 4.

La distribución del sistema de escobillas cuenta con 9 anillos de bronce localizados alrededor del eje principal, y entran en contacto con una escobilla de carboncillo electromagnético y un resorte unido a un cable. El contacto transmite información hacia la estructura superior del sistema y también a las tarjetas electrónicas. Los anillos se ordenan y etiquetan como se muestra en la Figura 4(a) y su disposición definitiva en la Figura 4(b).

La planta prototipo se puede acondicionar en tres configuraciones diferentes: la configuración *Bola y Viga*, la configuración *Balancín con Hélice* y la configuración *Bicóptero*. En la configuración bola y viga se adapta una canaleta en donde se instala un sensor ultrasónico en uno de sus extremos como se observa en la Figura 5 (a), donde el elemento de actuación corresponde a un servomotor controlado por PWM que se fija a la base de la estructura y se acopla al eje del brazo proporciona el movimiento lineal de subida y bajada de la barra.

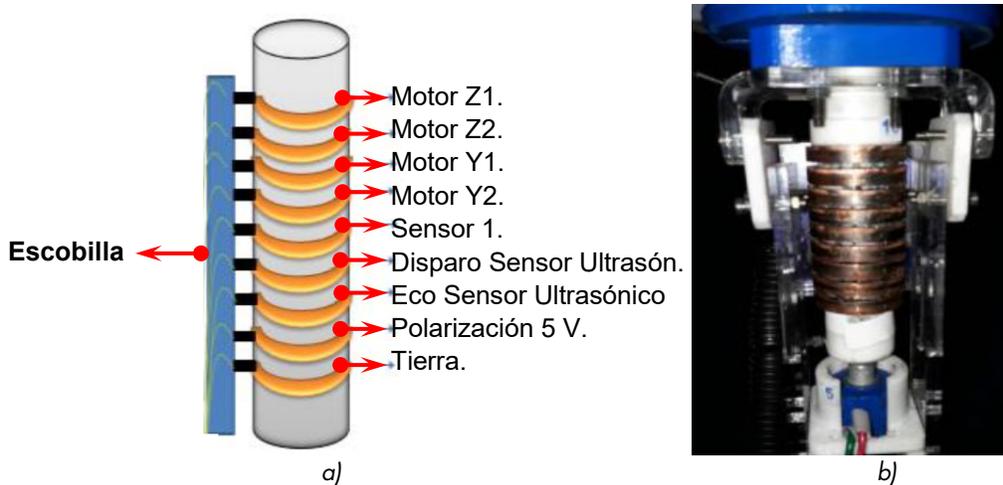


Figura 4. Esquema distribución sistema de escobillas con colector e implementado.

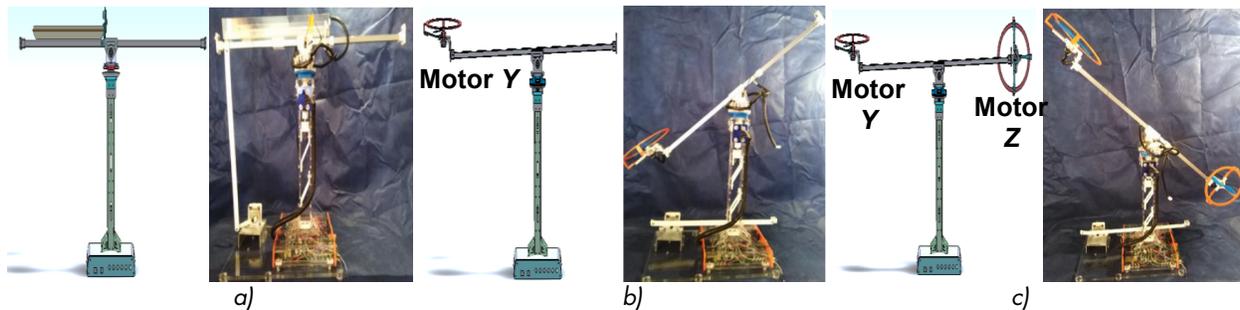


Figura 5. Esquema Modelo Solid Works® y Montaje Prototipo a) Configuración Bola y Viga. b) Configuración Balancín con Hélice y c) Configuración Bicóptero.

En la configuración balancín con hélice se adaptó un motor de corriente continua para el movimiento angular en Y en uno de los extremos de la barra, usando el contrapeso producido por el resto de la estructura y desactivando el motor para el movimiento angular en Z. Para la medición de la posición angular se adaptó un sensor resistivo lineal en el centro el eje superior como se observa en la Figura 5 (b). Para la configuración de Bicóptero se adaptaron rodamientos tanto para el desplazamiento vertical de la barra como para el desplazamiento rotacional lateral de 360 grados, como se observa en la Figura 5(c).

2.3. Instrumentación electrónica del prototipo

La Figura 6(a) ilustra la arquitectura de control realimentado conteniendo la instrumentación para el prototipo reconfigurable en todas sus disposiciones. Las señales de dos sensores potenciométricos lineales fueron usadas para medir la inclinación y el giro del balancín en la configuración balancín y bicóptero. La señal del sensor ultrasónico capta la distancia horizontal de la bola en el eje X en la configuración bola y viga. Las señales de los sensores se acondicionaron y concentraron usando canales de conversión analógica digital mediante una tarjeta microcontrolada PIC18f6410 de Microchip™.

Los ejes de cada sensor resistivo se acoplaron mecánicamente dentro de dos rodamientos para detección del movimiento tanto en el eje Y como en el Z. Los potenciómetros se polarizaron a 5 [V] y la lectura del sensor ultrasónico que mide la distancia X de la bola, se acondicionó proporcionalmente a 5 [V]. Las tres señales sensadas ingresan a tres entradas análogas a la tarjeta de adquisición que es reconocida por las plataformas de software especializado Matlab® como Lab-View™. Los controladores digitales se implementan en el computador, que genera las acciones de control a los lazos realimentados a través de la misma tarjeta microcontrolada que sirvió como sistema de adquisición y distribución de señales. Las señales de control se acondicionan mediante una etapa de potencia (drivers) al formato requerido para entregarse al servomotor de la configuración bola-viga y los motores DC de las hélices (señales PWM).

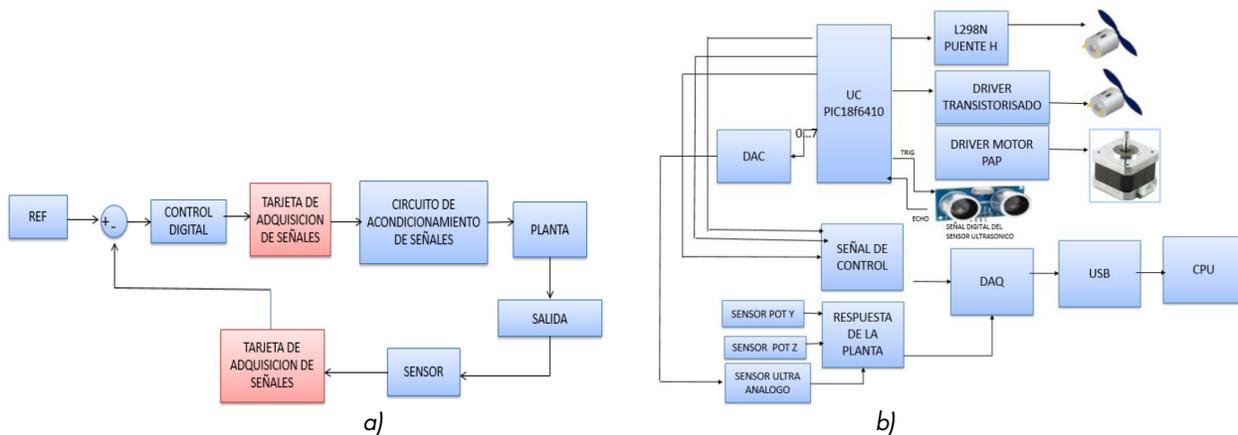


Figura 6. a) Arquitectura Lazo de Control Realimentado del prototipo mecatrónico reconfigurable. b) Disposición Sistema de Instrumentación y Acondicionamiento de Señales.

Los ejes de cada sensor resistivo se acoplaron mecánicamente dentro de dos rodamientos para detección del movimiento tanto en el eje Y como en el Z. Los potenciómetros se polarizaron a 5 [V] y la lectura del sensor ultrasónico que mide la distancia X de la bola, se acondicionó proporcionalmente a 5 [V]. Las tres señales sensadas ingresan a tres entradas análogas a la tarjeta de adquisición que es reconocida por las plataformas de software especializado Matlab® como Lab-View™. Los controladores digitales se implementan en el computador, que genera las acciones de control a los lazos realimentados a través de la misma tarjeta microcontrolada que sirvió como sistema de adquisición y distribución de señales. Las señales de control se acondicionan mediante una etapa de potencia (drivers) al formato requerido para entregarse al servomotor de la configuración bola-viga y los motores DC de las hélices (señales PWM).

El diagrama de bloques mostrado en la Figura 6(b) describe la disposición del sistema de instrumentación y acondicionamiento de señales implementado, mediante la integración de los diversos componentes electrónicos en tarjetas de circuito donde se destaca la etapa de potencia para actuadores, la etapa de acople de señal para sensores y la etapa de acondicionamiento de señales de control. El sistema reconfigurable dispone de un manual de uso y configuración para que los estudiantes en las prácticas de laboratorio en forma autónoma y colaborativa, ensamblen modularmente la planta en sus tres configuraciones, con la descripción de la conectividad requerida

para identificar los modelos de los lazos de control y contrastarlos con los modelos teóricos obtenidos.

3. Modelado de las Configuraciones de la Planta Prototipo

En la Tabla 1 se resumen los valores de los parámetros medidos que se utilizaron para obtener las funciones de transferencia a lazo abierto del prototipo en sus tres configuraciones, las cuales los estudiantes del curso de control verifican experimentalmente en el laboratorio.

Previo a la obtención del modelado de las plantas en sus tres configuraciones se ilustra a los estudiantes sobre el modelo de motores DC controlados por armadura, el modelado de servomotores controlados por PWM y el modelado de Motores Paso a Paso, actuadores ampliamente utilizados en plantas de control mecatrónicas, utilizando ecuaciones diferenciales y relaciones de balance masa energía (Kirchhoff, Newton), que al aplicar transformada de Laplace permite la obtención de sus respectivas Funciones de Transferencia.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del prototipo.

Parámetro	Dimensión	Descripción
l_v	47 [cm]	Longitud de la viga donde rueda la bola.
d_1	36 [cm]	Distancia del centro pivote a la derecha de la barra que sostiene las hélices.
d_2	30 [cm]	Distancia del centro pivote a la izquierda de barra que sostiene las hélices.
h_v	45 [cm]	Altura de la barra fija vertical.
h_{cb}	5 [cm]	Altura de la caja base.
h_T	80 [cm]	Altura total. Altura del brazo de la configuración bola y viga.
A_b	22 [cm]	Ancho de la base en el sistema de soporte.
$d_{hél}$	17 [cm]	Diámetro de las hélices.
r_{bola}	2.5 [cm]	Radio de la esfera en configuración bola y viga..
$r_{hél}$	8 [cm]	Radio de la hélice.
m_{mot}	0.36 [kg]	Masa conjunto motor hélice.
m_{bola}	0.0013 [kg]	Masa de la bola.
$m_{vig-bol}$	0.11 [kg]	Masa del conjunto bola y viga.
m_T	2.041 [kg]	Masa total de toda la estructura.
$U_{\theta Y}$	19 [V]	Voltaje alimentación nominal motor para el movimiento angular en Y.
$U_{\theta Z}$	12 [V]	Voltaje alimentación nominal motor para el movimiento angular en Z.
U_{servo}	5 [V]	Voltaje de servomotor para el sistema bola y viga.
f_{servo}	50 [Hz]	Frecuencia operación de servomotor para señal PWM.
V_{rpm}	14400 [rpm]	Velocidad máxima operación de motores hélices sin carga a 32 [v].

Previo a la obtención del modelado de las plantas en sus tres configuraciones se ilustra a los estudiantes sobre el modelo de motores DC controlados por armadura, el modelado de servomotores controlados por PWM y el modelado de Motores Paso a Paso, actuadores ampliamente utilizados en plantas de control mecatrónicas, utilizando ecuaciones diferenciales y relaciones de balance masa energía (Kirchhoff, Newton), que al aplicar transformada de Laplace permite la obtención de sus respectivas Funciones de Transferencia.



3.1. Modelado matemático para la configuración Bola y Viga

El sistema de control Bola y Viga consiste en una viga o barra por la cual corre una bola. En uno de los extremos de la barra se acopla el eje de un servomotor que recibe la señal de control para generar el movimiento vertical de la barra de tal manera que la bola se ubique en una posición deseada. En el otro extremo de la barra se ubica un sensor ultrasónico que mide la posición de la esfera.

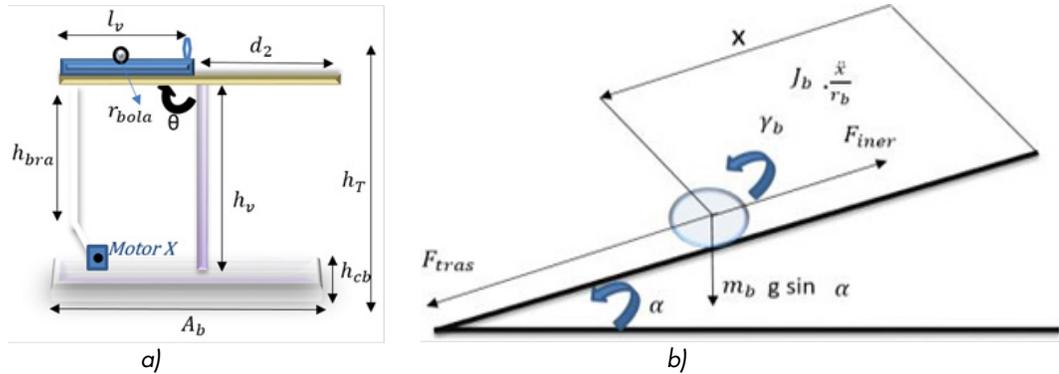


Figura 7. a) Esquema Sistema Bola y Viga. b) Diagrama cuerpo libre Subsistema mecánico.

El objetivo de control es mantener la posición de la bola en una posición de referencia, y que ante perturbaciones se estabilice rápidamente en ese punto de operación definido. Para el modelamiento de esta configuración se consideraron dos subsistemas, el primero corresponde al servomotor X y el segundo componente mecánico de la bola y viga, a partir del esquema ilustrado en la Figura 7 (a) (Apkarian, 2012).

La función de transferencia de cada configuración se referencia en el manual de uso del prototipo de forma detallada, donde el estudiante analiza y verifica su obtención. El modelo del sistema bola y viga primero consideró la relación del subsistema del servomotor a partir del uso de la segunda ecuación de Newton para sistemas rotacionales y Leyes de Kirchhoff, donde la señal de voltaje al servomotor proporciona una salida que corresponde al ángulo de inclinación α de la barra. El ángulo α ingresa al subsistema mecánico de la barra y la bola y la salida recae en la posición de la bola. En definitiva, el modelo del sistema a lazo abierto $G_{bv}(s)$ relaciona como salida la posición lineal de la bola medida por el sensor ultrasónico $X(s)$ con respecto al ancho del pulso PWM entregado al servomotor que ajusta el ángulo de inclinación de la viga $E_X(s)$.

El modelo del subsistema mecánico bola y viga se obtuvo usando la Ley de movimiento de Newton a partir del diagrama de cuerpo libre mostrado en la Figura 7(b). Las ecuaciones diferenciales obtenidas son de naturaleza no lineal por lo cual se linealizaron alrededor de un punto de operación correspondiente a posición de salida de la esfera de 5 a 40 [cm]. La función de transferencia del sistema bola viga se sintetizó en la Ecuación (1).

$$G_{bv}(s) = \frac{X(s)}{E_X(s)} = \frac{\alpha(s)}{E_X(s)} \cdot \frac{X(s)}{\alpha(s)} = \frac{K_m m_b g l_{brazo} r_b^2}{l_v (m_b r_b^2 + j_b) s^2 (\tau_m s + 1)} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde K_m es la constante de ganancia del servomotor, τ_m es la constante de tiempo del servomotor en [s], $g = 9.8$ [m/s²] la fuerza de gravedad, y j_b el momento de inercia de la bola que relaciona la aceleración y par de la bola intrínsecamente.

3.2. Modelado matemático para la configuración Balancín con Hélice

El sistema balancín se compone de una barra horizontal con un eje o pivote central, y donde en un extremo se adapta un motor DC que a partir de la variación de velocidad eleva la barra para que se mantenga estable ante perturbaciones en un ángulo de inclinación θ deseado. Para los sistemas del prototipo en configuración balancín y biónico, se plantea controlar la rotación de un elemento alrededor de su eje central de inercia.

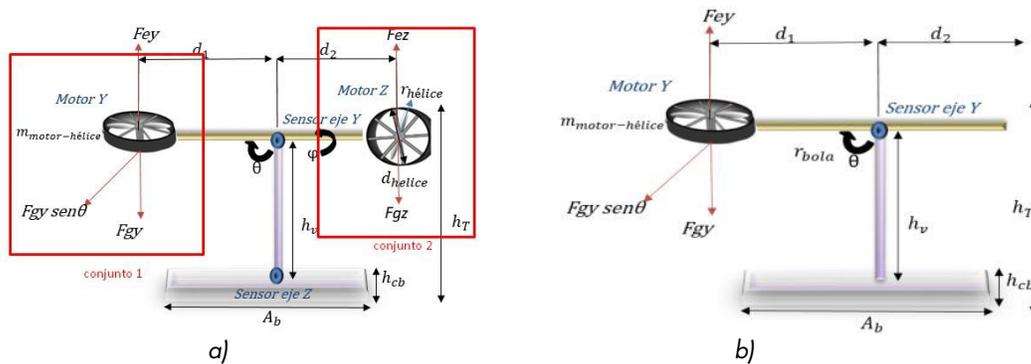


Figura 8. a) Diagrama de fuerzas del sistema balancín y biónico. b) Esquema Sistema Balancín con Hélice.

La variación del ángulo de rotación está determinada por la variación de la velocidad del motor, por tanto, el cambio en la velocidad se calcula con una ecuación que relaciona la aceleración con el torque, como se expresa en la Ecuación (2).

$$\sum \vec{\tau} = \vec{I}_X \vec{\alpha}$$

Ec. (2)

Para obtener el modelo aproximado del balancín con hélice se calcularon las fuerzas generadas en la configuración balancín y biónico descritas en el diagrama de fuerzas de la Figura 8(a) utilizando las ecuaciones de movimiento de rotación de un elemento rígido y momentos de inercia para la barra de la hélice y el motor Y. Se midió la masa m_Y y estimó el momento de inercia J_Y del conjunto 1 correspondiente al motor hélice en el eje Y.

Empleando las ecuaciones de torque y momento de inercia a partir del esquema de la Figura 8(b) y sustituyendo en la ecuación de movimiento de un sólido (Jiménez, 2016) se obtuvieron las ecuaciones diferenciales linealizadas del balancín alrededor de un punto de operación en un ángulo de inclinación $\theta = 0^\circ$, en $\pm 15^\circ$. La función de transferencia del balancín con hélice $G_{bh}(s)$ que relaciona la entrada de voltaje PWM ingresada al motor Y $E_V(s)$ con respecto al ángulo de inclinación de salida deseado del balancín $\Theta(s)$ medido a través de un potenciómetro lineal, que deriva en la Ecuación (3).



$$G_{bh}(s) = \frac{\Theta(s)}{E_Y(s)} = \frac{K_e d_1}{J_Y s^2 + d_1 \beta_Y s + d_1 F_g}$$

Ec. (3)

Donde F_g es la fuerza de gravedad, K_Y es la constante de fuerza de elevación debida a la propulsión del motor Y , β_Y la constante de fricción en el eje del motor Y .

3.3. Modelado matemático para la configuración Bicóptero.

En la configuración bicóptero el sistema tiene dos lazos de control: el de elevación de la barra del balancín mediante el motor del eje Y y el de giro de la barra del balancín con el motor en el eje Z como se ilustró en la Figura 8(a). La Figura 9(a) se ilustra el esquema de fuerzas del prototipo en la configuración bicóptero.

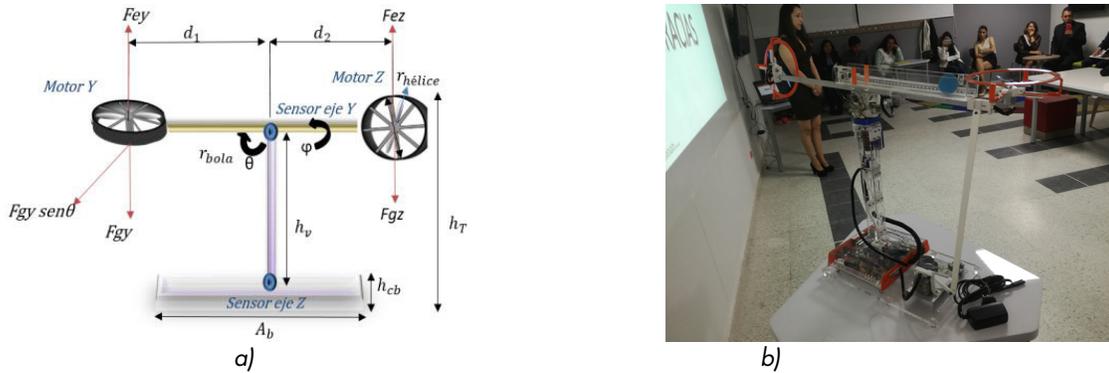


Figura 9. Esquema Sistema Bicóptero. b) Prototipo Implementado definitivo.

El modelo del bicóptero se fundamentó en el cálculo de fuerzas respecto al movimiento de los actuadores en el plano Y y Z . Al igual que el modelo del balancín, se emplearon las ecuaciones de torque y momento de inercia donde se obtuvieron dos funciones de transferencia: la función de transferencia $G_{by}(s)$ que corresponde a la relación de salida del ángulo de elevación de la barra en el eje Y medida por un potenciómetro lineal $\Theta(s)$ frente al estímulo de voltaje aplicado al motor Y $E_Y(s)$; y la dependencia de la salida del ángulo de rotación de la barra medida por otro potenciómetro lineal $\Psi(s)$ en términos del voltaje de entrada aplicado al motor en el eje Z $E_Z(s)$ se relaciona en la función de transferencia $G_{bz}(s)$. Estas funciones se relacionan en las Ecuaciones (4) y (5) respectivamente:

$$G_{by}(s) = \frac{\Theta(s)}{E_Y(s)} = \frac{K_{ey} d_1}{J_Y s^2 + d_1 \beta_Y s + d_1 F_{gy} + d_2 F_{gz}} \quad \text{Ec. (4)}$$

$$G_{bz}(s) = \frac{\Psi(s)}{E_Z(s)} = \frac{K_{ez} d_2}{J_Z s^2 + d_2 \beta_Z s + d_2 F_{gz}} \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde K_{ey} y K_{ez} son las constantes de fuerza de elevación de cada propulsor, F_{gy} y F_{gz} las fuerzas de gravedad con respecto a los ejes Y y Z . Las funciones de transferencia se utilizaron para diseñar y probar a partir de ellas controladores SISO como compensadores en frecuencia y controla-

dores PID para lazos de control simples, y se representaron también en el espacio de estados para diseñar y probar controladores multivariables mediante realimentación de variables de estado.

4. Implementación enfoque PBL en el curso de Control

Durante el primer (23 estudiantes) y segundo (18 estudiantes) semestre de 2019, se impartió el curso de Control en el Programa de Ingeniería Electrónica de la UPTC, donde se utilizó el prototipo de planta mecatrónica reconfigurable. Por cada semestre tres equipos de laboratorio, cada uno conformado por 3 estudiantes utilizaron la plataforma para desarrollar actividades de aprendizaje. La metodología PBL se implementó durante cada semestre a través del desarrollo de un proyecto final de curso.

Las características PBL preliminares comenzaron con la asignación del problema de control a cada equipo de trabajo relacionado con una configuración de la planta, seguido el aprendizaje se basa en identificar una situación del entorno real donde se aplique el problema de control. A partir de ello se realizan actividades donde brinda a los estudiantes información preliminar para resolver el problema de control, a partir de la cual en equipo consultan información complementaria para construir un marco teórico referencial y de antecedentes para luego formular el planteamiento del problema en un anteproyecto que se socializa en el curso y se ajusta para cumplir con especificaciones deseadas de operación. La Figura 10 ilustra este proceso PBL generalizado para equipo de trabajo.

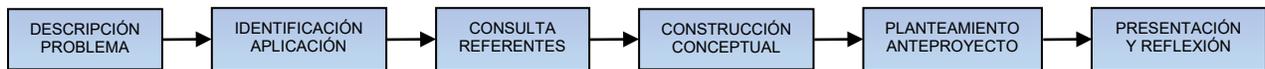


Figura 10. Proceso PBL generalizado para cada proyecto de curso de Control.

Una vez el proyecto sea presentado se ejecuta el cronograma del anteproyecto donde el docente hace seguimiento y realimentación a su desarrollo mediante actividades que permite al estudiante abordar problemas de ingeniería de control iniciando con la obtención del modelo matemático del sistema físico a controlar, la identificación experimental del sistema y su contrastación con el modelo teórico (Ley de Newton, Kirchhoff, principios de Lagrange, linealización, Laplace, Espacio de Estados), definición de especificaciones y el diseño (compensadores en frecuencia, controladores PID o Controladores RVE), simulación y ajuste de ganancias para lograr rendimiento deseado (usando plataformas de simulación compatibles con la planta como LabVIEW™, Matlab® o SciLab), implementación digital (Teorema de muestreo y discretización de sistemas) y evaluación de desempeño de controladores asignados (análisis de estabilidad, respuesta transitoria en tiempo y frecuencia y error en estado estacionario), partiendo del sistema instrumentado previamente desarrollado. Las etapas y actividades asociadas al desarrollo del proyecto final de control y la resolución del problema de control se resumen en el esquema de la Figura 11.

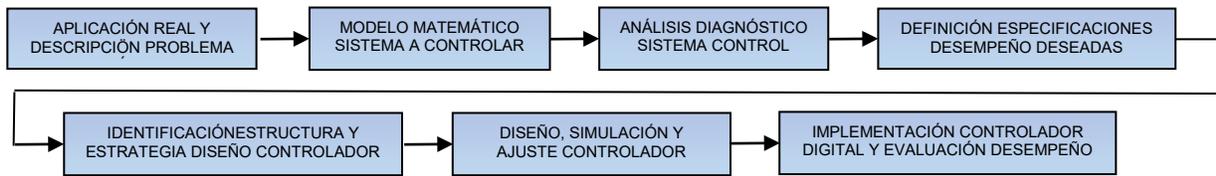


Figura 11. Etapas seguimiento Proyecto de Control mediante actividades PBL.

5. Discusión y análisis de resultados

5.1. Validación de la Planta

Se verificó el desempeño del comportamiento de las tres configuraciones de la planta primero identificando los modelos mediante el método de curva de reacción a lazo abierto de manera experimental sobre el prototipo alrededor de sus puntos de operación utilizando el Toolkit de *System Identification* de LabVIEW™ y el Toolbox *Ident* de Matlab®. Los escalones de entrada se ajustaron a amplitud de 2.5 y 5 [V] enviados desde un VI (Virtual Instrument) de pruebas implementado con el DAQ Assistant de LabVIEW™ que interconecta el prototipo con la Tarjeta de Adquisición NI USB 6341 de National Instruments™ como se describe en la Figura 12(a).

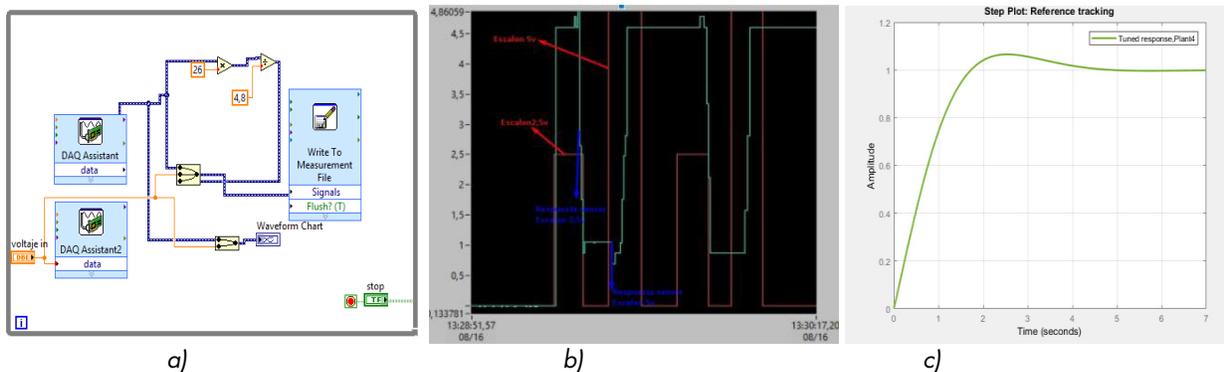


Figura 12. a) Programa de Prueba en LabVIEW™ para identificación de las plantas. b) Curva de reacción del sistema balancín observada en LabVIEW™. c) Curva de reacción del sistema balancín observada en Ident de Matlab®.

Los resultados de la identificación de los modelos experimentalmente se ajustaron en un 82% con respecto a los modelos teóricos obtenidos, mediante el método de aproximaciones polinomiales con modelos ARX(1,2). La respuesta del sistema en configuración bola y viga se realizó mediante el registro de la medición de la distancia de la bola entregada por el sensor ultrasónico análogo, en términos de voltajes entre 2.5 a 5 [V] para valores proporcionales de distancia de la bola entre 5 [cm] a 40 [cm]. Así mismo, en la configuración balancín y bicóptero se ingresaron escalones de entrada entre 2.5 a 5 [V] para valores proporcionales de ángulo de elevación en el eje Y entre -15° a $+15^\circ$, y cantidades proporcionales en el eje Z entre -45° a $+45^\circ$.

5.2. Diseño, Implementación y Análisis de Desempeño Controladores Digitales

A los estudiantes de los grupos de laboratorio se les asignó el diseño de controladores digitales SISO en tiempo y frecuencia, así como estrategias de control MIMO para las tres configuraciones,

considerando las temáticas revisadas en clase. Como herramienta de verificación del diseño se utilizó la herramienta de Simulink de Matlab® y un VI con los bloques del Toolkit *Control Systems* de LabVIEW™.

Una vez los estudiantes diseñan los controladores, los simulan e implementan con la planta física y realizan la evaluación de desempeño contrastando las especificaciones tanto estáticas como dinámicas definidas en el diseño con los resultados obtenidos en las respuestas de las señales de referencia, señales de control, señales de salida y señales de error observadas en los scopes de las plataformas de software.

En la Figura 13 se ilustra la respuesta de la implementación real de un controlador digital PID para el lazo de control del sistema bola y viga a partir de su montaje de la tarjeta de adquisición con la Planta realimentada.

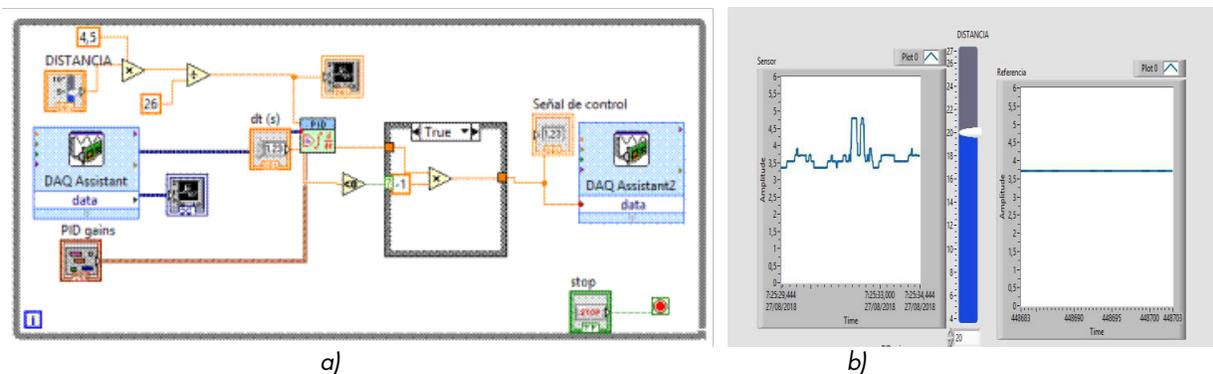


Figura 12. a) VI del controlador PID Digital realimentado para el sistema bola y viga programado en LabVIEW™. b) Respuesta señal de distancia de referencia y de posición de salida de la bola.

Así, mismo el estudiante tiene la posibilidad de habilitar o deshabilitar las acciones de control que desee y manipular las ganancias de las acciones de control para ver las respuestas en tiempo real de las plantas y analizar su desempeño.

6. Conclusiones

Se diseñó un equipo de laboratorio que permitió la configuración de tres plantas diferentes como apoyo al desarrollo experimental del curso de Control para aplicar estrategias de control tanto digital como analógico. El prototipo reconfigurable dispone de configuración balancín con hélice, bicóptero y bola y viga, para controlar variables de posición angular y distancia respectivamente. Este desarrollo es un equipo innovador, en el que los estudiantes desafiaron sus conocimientos de control tanto de modelado matemático como en diseño de controladores automáticos, siendo una herramienta tecnológica de apoyo para la implementación de actividades bajo el enfoque PBL en ingeniería electrónica.

La estructura del prototipo se diseñó y construyó con materiales asequibles y económicos, con prestaciones de modularidad, fácil ensamble y configuración. La parte estructural del equipo es estético.

co y de fácil movilidad ya que ocupa espacio limitado y bajo peso. En el sistema electromecánico se diseñó e implementó una estructura novedosa tipo colector de aros de cobre capaz de girar 360 grados, reduciendo el uso de cableado para no afectarla conectividad de los componentes electrónicos del prototipo.

En la instrumentación electrónica, se adaptó un circuito microcontrolado con los drivers necesarios para el control de los actuadores y sensores utilizados en las tres configuraciones. Se utilizó una tarjeta microcontrolada con todos los puertos y drivers de comunicación en montaje superficial lo que facilitó su uso y ocupó el espacio reducido en la caja de componentes.

En este trabajo se discutió el diseño, construcción e instrumentación de un prototipo reconfigurable asequible, sobre el cual se aplicó la metodología de aprendizaje PBL en un curso de ingeniería de control. Se describió como se puso en práctica el uso de la plataforma mecatrónica diseñada como herramienta didáctica que permitió a los estudiantes de la asignatura de control cubrir los objetivos de aprendizaje definidos de manera satisfactoria, mediante la definición de actividades para desarrollar un proyecto final de curso. Los estudiantes plantearon el problema de control, se involucraron dedicándole más calidad de tiempo en el diseño de controladores y análisis de resultados, en vez de invertirlo en construcción de plataformas.

Los estudiantes identificaron los modelos de las plantas del prototipo de planta mecatrónica configurable, donde implementaron controladores digitales SISO y MIMO, que fueron evaluados en su desempeño mediante la conectividad de la planta con la Tarjeta de Adquisición NI USB 6341 y el soporte del software LabVIEW™ y Matlab®. Finalmente se validó con éxito el prototipo reconfigurable bola y viga demostrando que es un equipo confiable y apropiado para aplicar diversas estrategias de control digital sobre las tres configuraciones de plantas posibles.

7. Referencias

- Alberto, M., Perez, A. y Perez, E. (2008). Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo, Cátedra de Control Universidad Nacional de San Juan, Argentina, Vol. 1, pp. 1-69.
- Lugowski, J. and Widmer, S. (2002). Problem Based Learning of Data Acquisition and Computer-Based Control Applications in MET Courses, in Proc. of ASEE Annual Conference and Exposition, Vol. 1, Montreal, pp. 1-11.
- Fernández-Samaca, L., Ramírez, J. M. y Orozco-Gutiérrez, M. L. (2012). Project-based learning approach for control system courses. Revista Controle & Automação, Vol. 23, No.1, pp. 94-107.
- Rodríguez, O. O., Fernández, L. y Estupiñán, S. (2014). Herramienta Virtual para la enseñanza de Control Automático usando PBL, Memorias del Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería – EIEI ACOFI '14, Vol. 1, Cartagena, pp. 1-6.
- Yuan, S. and Shen, Z. (2012). Study and application of PBL in control system course. Proceedings of 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks - CECNet '12, Vol. 1, Yichang, pp. 2874-2877.
- Jayaram, S. (2013). Implementation of Active Cooperative Learning and Problem-based Learning in an Undergraduate Control Systems Course, Proceedings of ASEE Annual Conference and Exposition, Vol. 1, Atlanta, pp. 1-15.



- Miranda, D. y Franca, A. C. (2019). Project Based Learning (PjBL) in engineering teaching: experience report on the discipline of Control Systems I at the Federal University of Mato Grosso, *Journal Research, Society and Development*, Vol. 8, No. 2, pp. 1-12.
- Mao, Y. and Yuan, S. (2017). Research and Application of Project-Based Learning in Modern Control Theory Course, *Proceedings of 3rd Conference on Education and Teaching in Colleges and Universities - CETCU '17*, Vol. 93, Taian, pp. 145-148.
- Apkarian, J., Karam, P., and Lévis, M. (2012). Ball and Beam Workbook for Student Experiment for LabVIEW™, Quanser Inc., Ontario, Canada, pp. 1-31.
- Jiménez, F. R., Mora, A. F., Yagma, H. D. y Zorro, J. D. (2015). Speed digital control for scale car via Bluetooth and Android, *Proceedings of 2015 Chilean Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies – CHILECON'15*, Vol. 1, Santiago de Chile, Chile, pp. 129-134.
- Jiménez, F. R., Higuera, C., Camacho, E. C. y Soler, F. A. (2015). PI Vectorial control of level and temperature for cascading tank system, *Proceedings of 2015 Chilean Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies – CHILECON'15*, Vol. 1, Santiago de Chile, Chile, pp. 67-72.
- Jiménez, F. R., Ruge, I. A. y Jiménez, A. F. (2016). Control Digital PID y Dead Beat para la Posición Angular de Helicóptero de un Grado de Libertad, *Memorias 1er Congreso Intenacional de Ciencias Básicas e Ingeniería – CICI '16*, Vol. 1, Villavicencio, Colombia, pp. 1-12.
- Ruge, I. A., Jiménez, F. R. y Hernández, O. M. (2017). Robot DARO: plataforma robótica para educación en ingeniería, *Revista Ingenium*, Vol. 18, Núm. 35, pp. 58-74.
- Jiménez, F. R., Ruge, I. A. y Jiménez, A. F. (2020). Modeling and control of a two wheeled auto-balancing Robot: A didactic platform for control engineering education, *Proceedings of the 18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology – LACCEI'20*, Vol. 1, Buenos Aires, Argentina, pp. 1-6.
- Bumb, N. (2013). Experimental Control Design for Ball and Beam System, Laboratory Report, University of Southampton, United Kingdom.
- Calvo, I., Cabanes, I., Quesada, J., & Barambones, O. (2018). A Multidisciplinary PBL Approach for Teaching Industrial Informatics and Robotics in Engineering. *IEEE Transactions on Education*, Vol. 61, No. 1, pp. 21–28.
- Qiang, S., Tan, L., Shi, X., Zhou, S., Lin Y. and Ma, M. (2020). A Continuous Design PBL Machinery Slide Table System Project in Control Engineering. *2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics – ISIE'20*, pp. 425-429.
- Foulis, C. Y., & Papadopoulou, S. (2018). A Portable Low-Cost Arduino-Based Laboratory Kit for Control Education. *2018 12th International Conference on Control – UKACC'18*.
- Kaewkham-ai, B., & Uthaichana, K. (2019). Integration of Project-Based Learning into Control System Laboratory Course for Electrical Engineering Students. *2019 IEEE International Conference on Industrial Technology – ICIT'19*.

Sobre los autores

- **Fabián Rolando Jiménez López:** Ingeniero Electrónico, MSc. en Ingeniería Automatización Industrial – UNAL. Profesor Asistente – Escuela de Ingeniería Electrónica de la UPTC e Integrante del Grupo de Investigación I²E. fabian.jimenez02@uptc.edu.co.



Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2022 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)

