

Diseño y control de un sistema balancín con motor y hélice de bajo costo

Design and control of a low-cost rocker with motor and propeller system.

Castaño Hernández, A.; Moreno Beltrán, J. P.; Hernández Pérez, J. F.; Villafuerte Segura, R.

A. Castaño Hernández

alexanderkstn@gmail.com

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

J. P. Moreno Beltrán

juanpablomorenobeltran@gmail.com

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

J. F. Hernández Pérez

hdz.pz.juanf@gmail.com

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

R. Villafuerte Segura

villafuerte@uaeh.edu.mx

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

ISSN-e: 2007-6363

Periodicidad: Semestral

vol. 5, núm. 10, 2018

sitioweb@uaeh.edu.mx

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/595/5952866014/>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Resumen: El presente trabajo es acerca del diseño y construcción de un banco de prueba conocido como sistema balancín. Así como de la implementación de una ley de control proporcional, integral, derivativa (PID) para la estabilización de dicho sistema. El banco de pruebas consta de dos barras (una horizontal y una vertical) ancladas entre sí a modo de balancín con un grado de libertad. Con el fin de manipular la posición angular de la barra horizontal se instaló un motor con hélice a modo de actuador. Para la construcción del banco, se utilizaron materiales de bajo costo y relativa accesibilidad. El sensor para medir la posición angular es un potenciómetro colocado sobre el eje rotacional que funciona como divisor de tensión proporcionando un voltaje acorde al movimiento. Por otro lado, la estabilización del sistema se logra mediante la aplicación de una ley de control PID sintonizada mediante el método de asignación de polos. El control se implementó utilizando la herramienta LabVIEW, mientras que para la adquisición de datos se empleó una tarjeta NI MyRIO.

Palabras clave: Controlador PID, Sistema balancín, Colocación de polos.

Abstract: The present work is about the design and construction of a test bench known as a rocking system. As well as the implementation of a proportional, integral, derivative control (PID) law for the stabilization of the system. The test bench consists of two bars (one horizontal and one vertical) anchored to each other as a rocker with a degree of freedom. In order to manipulate the angular position of the horizontal bar a motor with propeller was installed as an actuator. For the construction of the bank, materials of low cost and relative accessibility were used. The sensor for measuring the angular position is a potentiometer placed on the rotational axis that functions as a voltage divider providing a voltage according to the movement. On the other hand, the stabilization of the system is achieved by the application of a PID control law tuned by the method of pole assignment. The control was implemented using the LabVIEW tool, while a NI MyRIO card was used for data acquisition.

Keywords: LabVIEW, rocker with motor and propeller system, PID controller.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema balancín con motor y hélice es una particularidad de los vehículos aéreos no tripulados (UAVs, por sus siglas en inglés), nace como una necesidad de resolver el problema de controlar este tipo de dispositivos con mayor precisión. Mediante este dispositivo es posible recrear el comportamiento de posicionamiento de un eje de rotación de un UAV, por tal motivo en este trabajo se construye una plataforma del sistema balancín con motor y hélice en el cual es posible implementar un controlador con el objetivo no sólo de promover la enseñanza de la teoría de control, sino también proponiendo el diseño y construcción de una plataforma de bajo costo y gran accesibilidad.

Desde sus inicios y en la actualidad, la teoría de control tiene un gran impacto para la ciencia y tecnología en diferentes áreas, tales como la química (Medina (2008)), la aeronáutica (Barreno (2015)) y la medicina (Ortega (2011)), entre otras. Además, el control automático es una parte importante de los sistemas de vehículos espaciales, sistemas robóticos y procesos industriales en general (Ogata (2010)). A pesar de todos los avances en materia de control, el control PID sigue siendo el más utilizado en la industria moderna, controlando alrededor del 95 % de los procesos (Aström and Hägglund (1995)). El controlador PID es de las metodologías que se han mantenido a lo largo del tiempo debido a su practicidad (Morari and Skogestad (1986)), (Skogestad (2003)). Por ello es indispensable reforzar el proceso enseñanza-aprendizaje mediante una implementación experimental, donde sea posible aplicar de manera directa tanto la parte teórica como la práctica.

En (Cordero (2016)) y (Ballesteros and Río (2013)) se construyen plantas del sistema balancín con motor y hélice con motivos académicos. Es claro que la construcción de bancos de pruebas de bajo costo es ideal para el aprendizaje práctico de la teoría de control en las Instituciones Educativas, ya que al hacerlo uno mismo, los estudiantes tienen la oportunidad real de aplicar sus conocimientos en algo tangible, otro punto a favor es el hecho de que las plataformas para la aplicación de leyes de control suelen ser muy costosas, mientras que el presente banco de pruebas es relativamente más económico. Por estas razones en este documento se presenta el diseño y construcción de un banco de pruebas conocido como sistema balancín, el cual consta de dos barras ancladas mutuamente con un grado de libertad. En el extremo de la barra horizontal se encuentra un motor eléctrico sin escobillas con una hélice, con lo cuál se genera la fuerza de sustentación necesaria para mover la barra; la posición angular de la barra se obtiene de un potenciómetro en modo de divisor de tensión, proporcionando un voltaje diferente para cada ángulo. Utilizando una metodología basada en la asignación de polos se obtienen las ganancias del control PID, siguiendo como base el criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz al colocar las raíces del sistema del lado izquierdo del plano complejo asegurando la estabilidad del sistema, sirviéndose para esto de un polinomio propuesto, en el que ya se es conocido el lugar de sus raíces (Bolton (2001)).

El contenido de este escrito se organiza de la siguiente forma. Dentro de la Sección 2 se menciona el conocimiento necesario para llevar a cabo el desarrollo del trabajo. En la Sección 3 se muestran los resultados obtenidos: tanto el diseño, el modelado del sistema y el desarrollo del control. En la Sección 4 se muestra la implementación de los resultados teóricos propuestos en la sección anterior: resultados vía simulación y vía experimentación. Finalmente, en la Sección 5 se muestran las conclusiones.

2. PRELIMINARES

Dado que este trabajo se basa en el diseño y control de una plataforma experimental, es indispensable presentar los conceptos referentes al modelado matemático de la planta empleando la ley del movimiento rotacional de un sólido rígido, así mismo de la ley de control y su sintonización.

2.1. Ley de movimiento rotacional de Newton

La ley de movimiento rotacional de Newton establece que un momento de torsión resultante aplicado a un cuerpo rígido siempre genera una aceleración angular que es directamente proporcional al momento de torsión aplicado e inversamente proporcional al momento de inercia del cuerpo (Tippens (2007)). Por consiguiente, el momento de torsión resultante en un cuerpo se determina por

$$\sum \tau = I * \vec{a} \quad [1]$$

La ecuación (1) establece que el torque total que actúa sobre un cuerpo rígido τ es igual al momento de inercia del cuerpo I alrededor del eje de rotación multiplicado por su aceleración angular α (D. and Freedman (2009)).

El torque τ dado en Newton-metro ($N*m$), se define como la tendencia a producir un cambio en el movimiento rotacional y se ve afectado tanto por la magnitud de la fuerza $\vec{F}$ (Newtons) como el brazo de palanca $\vec{r}$

$$\tau = \vec{F} \times \vec{r} \quad [2]$$

El momento de inercia rotacional I se refiere a la resistencia que opone un cuerpo al cambio en su movimiento rotacional, definida como

$$I = \sum (m * r^2) \quad [3]$$

donde m es la masa del cuerpo y r es vector posición del eje de rotación (Tippens (2007)).

2.2. Controlador PID

La estabilidad de un sistema requiere del diseño de una ley de control que sea capaz de predecir el comportamiento dinámico de la respuesta a partir de cierto conocimiento de la planta (Ogata (2010)). La estructura PID es un controlador realimentado el cual uno de sus propósitos es hacer que el error, diferencia entre la señal de referencia y la señal de salida de la planta, sea cero (Pérez M. A., Pérez and Pérez (2008)). Un controlador PID está conformado por tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D), el cual se muestra en la Figura 1, ver (Pérez M. A., Pérez and Pérez (2008)).

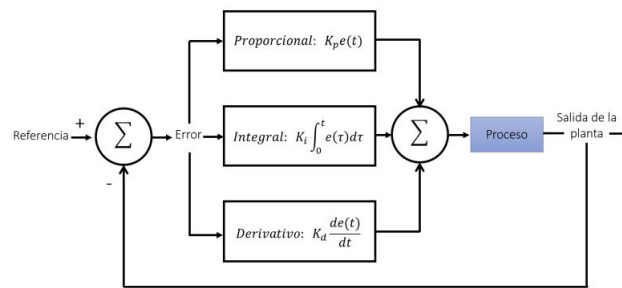


FIGURA 1

Figura 1: Estructura de un controlador Proporcional, Integral y Derivativo

Acción proporcional: La acción de control (P) da una salida del controlador que es proporcional al error (Pérez M. A., Pérez and Pérez (2008)), la cual puede ser descrita en el dominio de la frecuencia tal que:

$$C_p(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p \quad [4]$$

donde k_p es la ganancia proporcional ajustable.

Acción integral: La acción (I) da la salida del controlador proporcional al error acumulado, lo que implica una respuesta de control lenta. Esta acción puede ser definida en el dominio de la frecuencia mediante la siguiente función de transferencia (Pérez M. A., Pérez and Pérez (2008))

$$C_i(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{k_i}{s} \quad [5]$$

donde k_i es la ganancia integral ajustable.

Acción derivativo: La acción de control (D) actúa cuando hay un cambio en el valor absoluto del error, corrigiendo sólo los errores en la etapa transitoria. Al ser una acción predecible su respuesta es rápida (Pérez M. A., Pérez and Pérez (2008)). Esta acción se define en el dominio de la frecuencia como

$$C_d(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_d s \quad [6]$$

donde k_d es la ganancia derivativa ajustable.

Así, un controlador PID está conformado por la suma de las tres acciones anteriores, con función de transferencia

$$C_{PID}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad [7]$$

2.3. Sintonización de ganancias del controlador PID

Uno de los métodos para la obtención de ganancias de un controlador PID, es la asignación de polos. Este método suele emplearse para colocar los polos de una función de transferencia (o raíces de un polinomio) en un lugar deseado en el plano complejo.

Para realizar un controlador por asignación de polos, debe conocerse a priori el modelo matemático linealizado que represente la dinámica de la planta (o Función de Transferencia) (Pérez M. A., Pérez and Pérez (2008)). Este método consiste en proponer un polinomio de la forma $P_p(s) = a_0s^m + a_1s^{m-1} + \dots + a_ms + a_m$, que junto con el polinomio característico $P(s) = b_0s^n + b_1s^{n-1} + \dots + b_ns + b_n$, cumplan con tres características primordiales:

Mismo Orden ($m = n$),

Mónico ($a_0 = b_0 = 1$),

Coefficientes Iguales.

Además, para garantizar la estabilidad del sistema en lazo cerrado (o polinomio característico) es necesario auxiliarse del criterio de estabilidad de Hurwitz.

El criterio de estabilidad de Hurwitz determina la estabilidad del sistema en lazo cerrado a partir de la ubicación de polos de su función de transferencia (FT) (también nombradas raíces de su polinomio característico) en el plano complejo. Dicho criterio asegura que, si todos los polos (puntos singulares en los que la FT o su derivada tiende infinito) de la función de transferencia están del lado izquierdo del plano complejo, entonces el sistema es estable, sin embargo, si hay por lo menos un polo del lado derecho del plano complejo, el sistema es inestable. En el caso de que los polos se encuentren sobre el eje imaginario del plano complejo, el sistema será marginalmente estable, ver (Ballesteros and Río, 2013).

3. RESULTADOS PRINCIPALES

3.1. Modelado matemático del sistema.

Partes mecánicas. El principio mecánico del balancín con motor y hélice se muestra en la Figura 2, donde el parámetro L representa la longitud total de la barra móvil; $\theta(t)$ el desplazamiento angular; $D1$ la longitud de la barra vertical; l la distancia del eje de rotación al punto de ubicación del motor; τ el torque; m la masa del motor; g la constante de aceleración gravitacional terrestre; F_e la fuerza de empuje generada por el giro de las hélices; $F\beta$ la fuerza producida por el coeficiente de fricción β y F_g el peso del motor.

Además, la fuerza de gravedad en la dirección y generada por la masa del motor, tomando como eje de referencia la barra horizontal, esta dada por

$$F_{g_y} = F_g \sin \theta(t) \quad [8]$$

Para fines prácticos la ecuación (8) se linealiza mediante la Serie de Taylor, teniendo la siguiente expresión $\sin \theta(t) \approx \theta(t)$

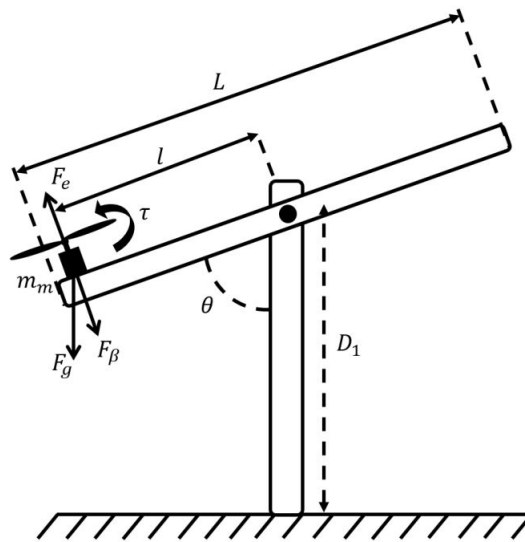


FIGURA 2

Figura 2: Principio mecánico del balancín con motor y hélice.

Modelo matemático. Para obtener la ecuación de movimiento que caracteriza a la planta se emplea la ley de movimiento rotacional de Newton descrita en la Sección 2, además de considerar que el eje de inercia de la barra móvil está ubicado justo en su centro de gravedad, razón por la cual la fuerza resultante sobre la barra será nula, debido a las compensaciones entre sí de estas magnitudes. Por lo anterior sólo serán de interés las fuerzas debidas al empuje de las hélices en movimiento, el peso del motor y a la fricción producida en el eje de giro debido al potenciómetro.

Tomando la ecuación (1), así como las consideraciones anteriores, el comportamiento físico del sistema balancín con motor y hélice se describe mediante la siguiente ecuación

$$\tau_m - \tau_{F_{gy}} - \tau_{f_\beta} = I_T \cdot \ddot{\alpha} \quad [9]$$

donde τ_m es el torque generado por el movimiento de las hélices; $\tau_{F_{gy}}$ el torque generado por el peso del motor; τ_{f_β} el torque generado por la fricción en el sistema debido al potenciómetro; I_T el momento de inercia total de la planta y $\ddot{\alpha}$ la aceleración angular. Sustituyendo en la ecuación (9), la expresión general de la sumatoria de los torques se describe en la siguiente ecuación

$$lF_e(t) - lF_g\theta(t) - l\beta\dot{\theta}(t) = I_T\ddot{\theta}(t), \quad [10]$$

ordenando los términos de la ecuación (10), tenemos que el modelo matemático del sistema es

$$\ddot{\theta}(t) + \frac{l\beta}{I_T}\dot{\theta}(t) + \frac{lF_g}{I_T}\theta(t) = \frac{lF_e(t)}{I_T}, \quad [11]$$

donde F_e es la entrada dada por la fuerza de empuje generada por el giro de las hélices y $\theta(t)$ es la salida denotada por la posición angular.

Una vez determinada la ecuación (11), se obtiene la función de transferencia de la planta, debido a que en el dominio frecuencial el análisis matemático es más sencillo, teniendo como resultado la siguiente ecuación

$$\frac{\theta(s)}{F_e(s)} = \frac{\frac{l}{I_T}}{s^2 + \frac{l\beta}{I_T}s + \frac{lF_g}{I_T}} \quad [12]$$

Como puede notarse, la ecuación (12) corresponde a un sistema de segundo orden, que de forma general se representa mediante la siguiente expresión

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2}, \quad [13]$$

donde ω_n es la frecuencia natural no amortiguada y δ el factor de amortiguamiento. Mediante método de asignación de polos se igualan los coeficientes de los términos de los denominadores de las ecuaciones (12) y (13) y se determinan los parámetros δ y ω_n , donde

$$2\delta\omega_n = \frac{l\beta}{I_T}, \quad [14]$$

$$\omega_n^2 = \frac{lF_g}{I_T}, \quad [15]$$

$$K = \frac{l}{I_T} \quad [16]$$

La obtención del tiempo de establecimiento t_s se realiza al observar la respuesta escalón del sistema mediante una saturación con una referencia de 67 grados, esto debido a las limitaciones físicas. Dicho comportamiento se muestra en la Figura 3.

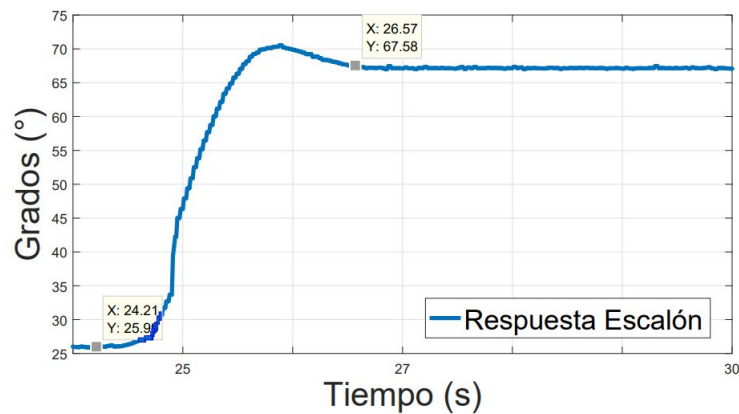


FIGURA 3

Figura 3: Respuesta escalón del sistema balancín con motor y hélice.

A continuación se resumen todos los parámetros conocidos del sistema balancín con motor y hélice:

$l = 0.3\text{m}$ (distancia del eje de rotación al punto de colocación del motor en metros).

$L = 0.6\text{m}$ (longitud de la barra móvil en metros).

$t_s = 2.579\text{seg.}$ (tiempo de establecimiento).

$m_m = 0.06\text{kg}$ (masa del motor).

$I_T = 0.0108\text{kgm}^2$ (momento de inercia total del sistema).

$F_g = m_m g$ (peso del motor)

Parámetro ω_n : Primero se calcula la frecuencia natural no amortiguada del sistema, despejando de la ecuación (15) a ω_n

$$\omega_n = \sqrt{\frac{lF_g}{I}} = \sqrt{\frac{lm_m g}{I_T}} = \sqrt{\frac{(0.3\text{m})(0.06\text{kg})(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})}{0.0108\text{kgm}^2}},$$

$$\omega_n = 4.04 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$
[A]

Parámetro δ : Para calcular el valor de δ , se emplea la fórmula del tiempo de establecimiento t_s y tomando en cuenta el criterio del 2 % obtenemos la siguiente expresión

$$t_s = \frac{4}{\delta \omega_n} \Rightarrow \delta = \frac{4}{t_s \omega_n},$$
[17]

utilizando la ecuación (17), tenemos que el valor del factor de amortiguamiento δ es:

$$\delta = \frac{4}{(2.579\text{s})(4.04 \frac{\text{rad}}{\text{s}})} = 0.3839,$$
[B]

puede notarse que el sistema es subamortiguado ya que $0 < \delta < 1$

Parámetro K: Ahora se calcula el valor de la constante K empleando la ecuación (16).

$$K = \frac{l}{I_T} = \frac{0.3m}{0.0108kgm^2} = 27.77\left(\frac{1}{kgm}\right) \quad [C]$$

Una vez calculados los parámetros necesarios, se sustituyen en la ecuación (13), para obtener la función de transferencia de la planta, definida como

$$\frac{\theta(s)}{F_e(s)} = \frac{27.77}{s^2 + 3.102s + 16.32} \quad [18]$$

3.2. Diseño del control.

De acuerdo con el análisis descrito anteriormente, el sistema balancín con motor y hélice es segundo orden y se asume no estable, motivo por el cual se implementará un controlador con el fin de estabilizarlo. Existen diversas teorías de control aplicables al sistema, sin embargo el método del control PID al ser sencillo y universal, es apropiado para la planta en cuestión.

En la Figura 4 se muestra el diagrama a bloques del sistema en lazo cerrado, que incluye tanto el control PID como la planta, del cual se obtendrá el polinomio característico para la sintonización de las ganancias k_p , k_i y k_d mediante el método de asignación de polos.

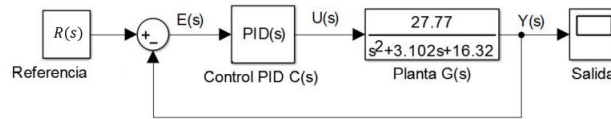


Figura 4: Sistema de control en lazo cerrado.

FIGURA 4

Figura 4: Sistema de control en lazo cerrado

La función de transferencia del control PID se define como

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad [19]$$

Teniendo el sistema de lazo cerrado y habiendo definido, tanto la función de transferencia del control $C(s)$ como de la planta $G(s)$, se obtuvo la función de transferencia del sistema en lazo cerrado, cuya expresión está dada por

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{27.77(k_d s^2 + k_p s + k_i)}{s^3 + (3.102 + 27.77k_d)s^2 + (16.32 + 27.77k_p)s + 27.77k_i}$$

[20]

Por lo tanto, de la ecuación (20), se tiene que el polinomio característico $P(s)$ del sistema de lazo cerrado es:

$$P(s) = s^3 + (3.102 + 27.77k_d)s^2 + (16.32 + 27.77k_p)s + 27.77k_i \quad [21]$$

Empleando el método de colocación de polos, se obtiene las ganancias k_p , k_i y k_d . Se sabe que el polinomio característico del sistema en lazo cerrado es el representado en la ecuación (21), por lo que se propone un polinomio cuyas raíces se encuentran del lado izquierdo del plano complejo, asegurando con ello, la estabilidad del sistema de acuerdo al criterio de Hurwitz. El polinomio de tercer orden propuesto, tiene una raíz real y dos complejas, cumpliendo con las características antes descritas, mismo que se muestra a continuación

$$P_p(s) = (s+0.044)(s-1.6677+3.84i)(s-1.6677-3.84i) \quad [22]$$

El motivo por el que se eligió el polinomio de la ecuación (22), es debido a que el actuador al trabajar con señales pequeñas requiere de raíces que se ajusten a ellas. Debido a esto es por lo que mediante la práctica y experiencia se determinó tal polinomio, evitando así una posible saturación del actuador. De la ecuación (22), se desarrolla el polinomio propuesto tal que:

$$P_p(s) = s^3 + 3.3797s^2 + 17.7085s + 0.77756 \quad [23]$$

Igualando los coeficientes del polinomio propuesto con los del polinomio característico, se tiene:

$$\begin{aligned} 3.102 + 27.77k_d &= 3.3797, \\ 16.32 + 27.77k_p &= 17.7085, \\ 27.77k_i &= 0.77756, \end{aligned} \quad [D]$$

entonces:

$$\begin{aligned} k_p &= \frac{17.7085 - 16.32}{27.77} = 0.05, \\ k_i &= \frac{0.77756}{27.77} = 0.0279 \approx 0.028, \\ k_d &= \frac{3.3797 - 3.102}{27.77} = 0.01, \end{aligned} \quad [E]$$

por lo tanto, acorde a los cálculos realizados anteriormente, las ganancias necesarias para estabilizar al sistema balancín con motor y hélice son las siguientes:

$$k_p = 0.05, k_i = 0.028 \text{ y } k_d = 0.01$$

[F]

3.3. Diseño.

El sistema balancín con motor y hélice se caracteriza por permitir la manipulación de la posición del balancín en determinadas áreas de operación gracias a la fuerza de sustentación que genera la hélice del motor eléctrico sin escobillas. Este sistema tiene una sola entrada F_e y una sola salida θ , por lo cual es definido como un sistema SISO (Single Input Single Output). El sensor utilizado para detectar la posición es un potenciómetro, utilizado como divisor de tensión acoplado al punto de giro de la barra horizontal; de esta manera se obtiene un voltaje diferente para cada posición. En la Figura 5, se muestra la estructura física de la planta, en la cual fue implementada la ley de control descrita en este documento. La principal limitación de la planta radica en la falta de datos y parámetros físicos exactos acerca de su composición y estructura, tales como, el coeficiente de fricción dinámico y estático propios del movimiento del potenciómetro, sin embargo, al tener un modelo aproximado se logró el objetivo planteado.

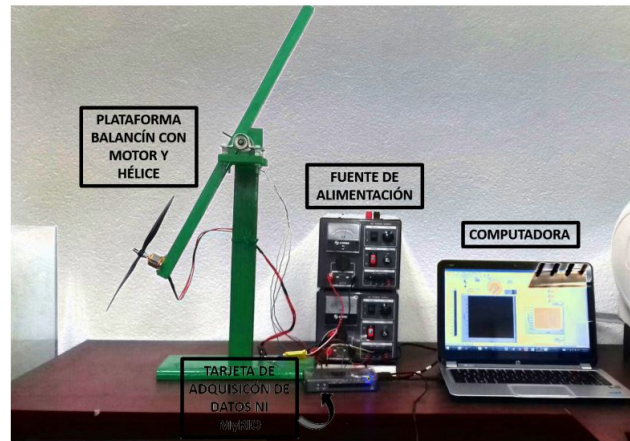


FIGURA 5

Figura 5: Planta física.

El diagrama de bloques de todo el sistema se puede apreciar en la Figura 6.

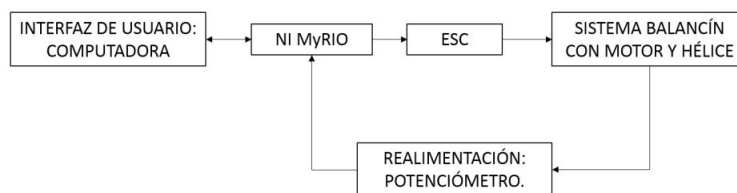


FIGURA 6

Figura 6: Sistema balancín con motor y hélice.

El sistema está compuesto por una computadora, la tarjeta NI MyRIO, el controlador de fábrica ESC (Electronic Speed Controller), el motor eléctrico sin escobillas, el sistema balancín con motor y hélice y el potenciómetro. Todo el sistema se encuentra en lazo cerrado.

La computadora efectúa el control a través del software LabVIEW, que a su vez se sirve de la tarjeta de adquisición de datos NI MyRIO para leer la posición del balancín según la tensión que envíe el

potenciómetro, después, para gobernar el motor se emplea el controlador de fabrica ESC el cual funciona con PWM (pulse-width modulation), este es generado por la misma tarjeta dependiendo de la señal que envíe el control. De esta forma se puede conocer y ajustar la posición de la barra en todo momento.

Se conoce de antemano la masa de las dos barras además de que el punto de giro se encuentra en el centro de gravedad de la barra horizontal de tal forma que se facilite el control

4. IMPLEMENTACIÓN

Para comprobar que lo propuesto en la teoría es funciona, se hizo una simulación a partir de la función de transferencia para después probar la planta diseñada.

4.1. Simulación.

Una vez obtenido el modelo dinámico del sistema, se debe comprobar que el funcionamiento del mismo es el adecuado, para ello se hace uso de la herramienta Matlab/Simulink para que, a partir de la función de transferencia se pueda observar el desempeño de la planta con el control propuesto y las ganancias obtenidas. En la Figura 7 se puede observar el diagrama a bloques empleado para tal proposito.

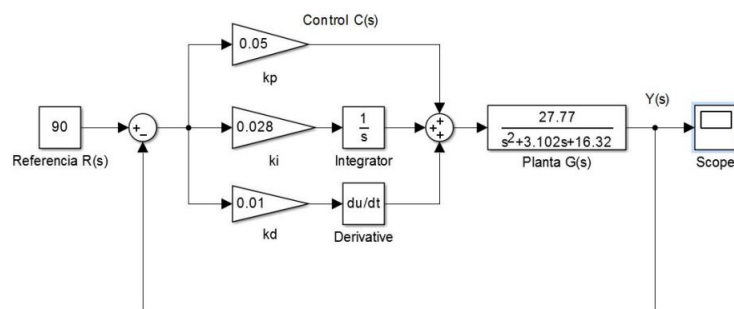


FIGURA 7

Figura 7: Simulación del sistema en Matlab.

En la Figura 8 se observa la respuesta obtenida en la simulación con una referencia en 90 grados en la cual se puede observarse el comportamiento esperado del sistema cuando la barra se encuentra en una posición horizontal.

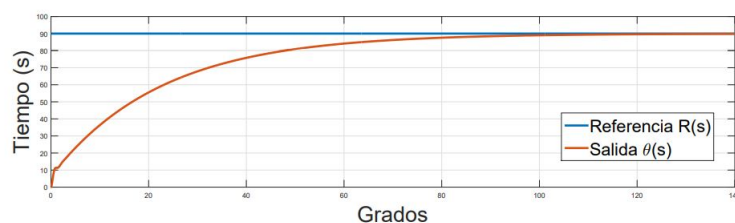


FIGURA 8

Figura 8: Respuesta obtenida en la simulación.

4.2. Experimentación.

Después de haber comprobado con la simulación que el comportamiento del sistema es el adecuado, se procedió a hacer la implementación directa en la planta. Para ello se utilizó el software de LabVIEW y la tarjeta de adquisición de datos NI MyRIO, la cual es capaz de tomar lecturas fieles del mundo real a bajas tensiones (5V), y que además es fácil de conectar pues no requiere de fuente de alimentación externa al conectarse en la computadora.

En la Figura 9 se puede observar el diseño del control en LabVIEW, y en la Figura 10 la interfaz creada con dicho control, de manera que el usuario pueda ver el funcionamiento de la planta en todo momento.

LabVIEW es una herramienta bastante útil al momento de implementar leyes de control, ya que su estilo de programación a bloques simplifica el proceso de programación haciendo que la lógica del programa sea más parecida al pensamiento del hombre. Aplicando este principio, en el presente diseño se tomó la lectura del potenciómetro para interpretarla como los ángulos de giro del balancín, luego se colocaron los bloques del control PID, y finalmente se adecuó la señal de salida del control para que variara el PWM del controlador del actuador y de esta manera controlara su posición

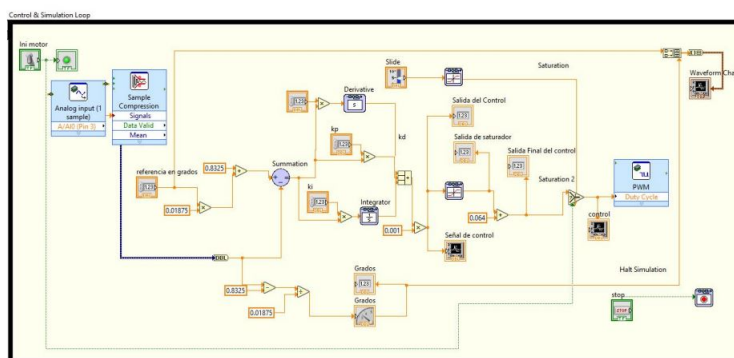


FIGURA 9

Figura 9: Control diseñado con LabVIEW.



FIGURA 10

Figura 10: Interfaz de usuario generada por LabVIEW.

El comportamiento de la planta se puede observar en la Figura 11, donde se aprecian las respuestas para diferentes referencias dadas en grados, así como el tiempo que tarda el sistema en ajustarse a dichas referencias.

Se observa que el comportamiento real difiere levemente de lo obtenido teóricamente y en la simulación, esto se debe a que los componentes empleados tienen un comportamiento no ideal como el potenciómetro, que no es lineal y el hecho de que en los cálculos no se tomó en cuenta la función de transferencia del motor.

El comportamiento de la señal de control se puede apreciar en la Figura 12, debido a que el actuador funciona con una señal PWM, el control se encuentra dado en un ciclo de trabajo para PWM entre 0 y 1, es decir, entre 0 % y 100 %.

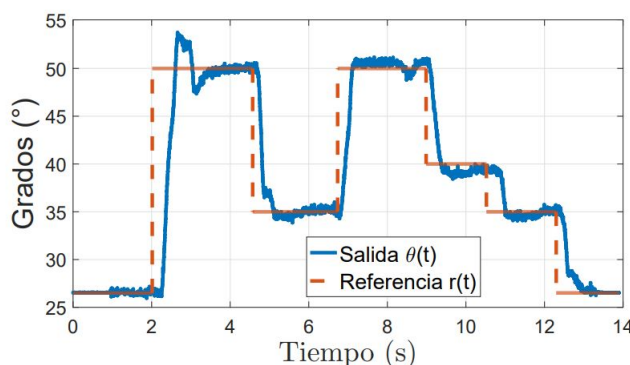


FIGURA 11

Figura 11: Funcionamiento de la planta para diferentes referencias en grados.

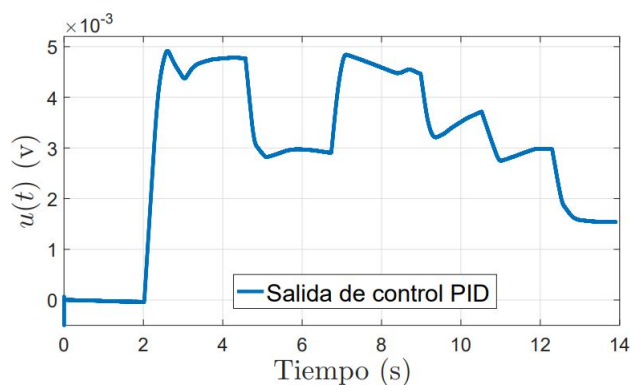


FIGURA 12

Figura 12: Variación del ciclo de trabajo de la señal.

Como punto final se realizó una prueba de robustez del sistema sometiéndolo a perturbaciones en diferentes instantes del tiempo, en este caso, lo que se hizo fue golpear físicamente el balancín desde diferentes ángulos para moverlo fuera de la referencia. De esta manera se demuestra la robustez de la ley del control propuesta ya que el control inmediatamente detectó el cambio e hizo lo necesario para llevar la respuesta del sistema de vuelta a la referencia. El resultado de esta prueba se presenta en la Figura 13 y la acción de control utilizada durante esta prueba se aprecia en la Figura 14.

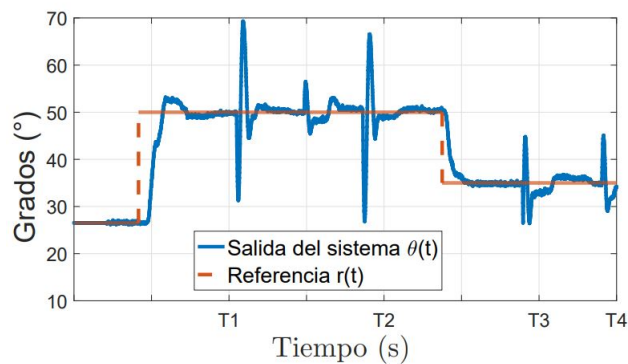


FIGURA 13

Figura 13: Prueba de robustez del sistema.

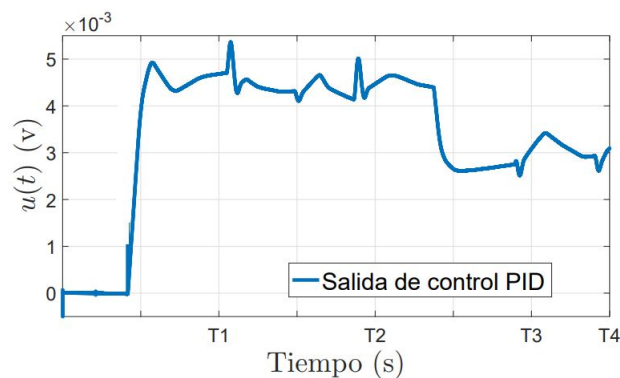


FIGURA 14

Figura 14: Señal de control durante la prueba de robustez.

5. CONCLUSIÓN

La aplicación de la teoría de control clásica es muy importante ya que en la actualidad la mayoría de los controladores industriales emplean el control PID.

El presente trabajo analiza el sistema balancín con motor y hélice; muestra el modelo matemático; propone una ley de control para que la planta se ajuste a una referencia en grados, o haga el seguimiento de una señal; y muestra el diseño de una planta de bajo costo. El controlador elegido para la planta es del tipo PID.

Para la implementación se emplea la tarjeta NI MyRIO como medio de adquisición de datos y para enviar la señal de control al actuador.

De esta manera se construye una plataforma útil para el proceso enseñanza aprendizaje de la teoría de control.

REFERENCIAS

- Aström, K. J., Hägglund, T. H., 1995. New tuning methods for PID controllers, tercera Edition.
- Ballesteros, M., Río, A. D., 2013. Control de Posición de un balancín con Arduino.
- Barreno, Y. S., 2015. Diseño, construcción e implementación de banco de pruebas para sistemas de control implementando PID.
- Bolton, W., 2001. Ingeniería de control, segunda Edition.

- Cordero, E., 2016. Diseño y construcción de un prototipo de sistema motor hélice-balancín.
- D., Y. H., Freedman, R. A., 2009. Física universitaria Volumen 1, décimo segunda Edition.
- Medina, J. L., 2008. La automatización en la ingeniería química, primera Edition.
- Morari, D. E. R. M., Skogestad, S., 1986. PID Controller Design, Internal Model Control.
- Ogata, K., 2010. Ingeniería de control moderna, quinta Edition.
- Pérez M. A., Pérez, A., Pérez, E., 2008. Introducción a sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo.
- Skogestad, S., 2003. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning.
- Tippens, P. E., 2007. Física conceptos y aplicaciones, séptima Edition.
- Ortega, A. B., 2011. Prototipo virtual de un rehabilitador de tobillo.