

Sintonización y comparación de controladores para un aeropéndulo

CASTILLO, Gregorio †*, GÓMEZ, Elda', GONZAGA, Elisa y REYES, Iván

Ingeniería Mecatrónica, Instituto Tecnológico Superior de Huauchinango-ITSH-TecNM, Av. Tecnológico No 80, 5 de Octubre, Huauchinango, Puebla, México. C.P. 73160.

Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico Superior de las Choapas-ITSCH-TecNM, Carretera Las Choapas - Cerro de Nanchital, J. Mario Rosado, Las Choapas, Veracruz, C.P 96980

Recibido 2 de Junio, 2017; Aceptado 8 de Septiembre, 2017

Resumen

En este artículo se presenta la aplicación de distintos sistemas de control a un aeropéndulo, el cual es una extensión del péndulo simple con la diferencia de que el aeropéndulo cuenta con un motor como masa. Este motor permite posicionar el aeropéndulo en una posición angular deseada por medio de los sistemas de control aplicados. Los sistemas de control que fueron desarrollados para este sistema: control PID, asignación de polos por retroalimentación de estados y controlador fuzzy, para lograr ese objetivo se modeló la dinámica del aeropéndulo usando el método de Euler- Lagrange y se linealiza con el método de retroalimentación. Cada controlador fue aplicado en un entorno de realidad virtual desarrollado en Simulink de Matlab para verificar la efectividad de estos y después ser aplicados al modelo físico. Los resultados de la simulación y del modelo físico fueron medidos y comparados para verificar su veracidad; buscando identificar las fortalezas y debilidades de cada uno de los controladores y la dinámica bajo la que trabaja cada uno de ellos.

Aeropéndulo, control difuso, control PID, trayectoria del plano de fase

Abstract

In this work presents the application of different control systems to an aeropendulum, which is an extension of the simple pendulum with the difference that the aeropendulum has an engine as mass. This motor allows to position the aeropendulum in a desired angular position by means of the applied control systems. The control systems that were developed for this system: PID control, poles assignment by state feedback and fuzzy controller, to achieve that objective was modeled the dynamics of the aeropendulum using the Euler-Lagrange method and linearized with the feedback method. Each controller was applied in a virtual reality environment developed in Matlab Simulink to verify the effectiveness of these and then applied to the physical model. The results of the simulation and the physical model were measured and compared to verify their accuracy; Seeking to identify the strengths and weaknesses of each of the controllers and the dynamics under which each one works.

Aeropendulum, fuzzy control, PID control, phase plane trajectory

Citación: CASTILLO, Gregorio, GOMEZ, Elda, GONZAGA, Elisa y REYES, Iván. Sintonización y comparación de controladores para un aeropéndulo. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2017. 1-3:16-26.

† Investigador contribuyendo como primer autor.

*Correspondencia al Autor Correo Electrónico: gcastillo@itsh.edu.mx

Introducción

Las prácticas de laboratorio han formado parte del plan de estudios de Ingeniería Mecatrónica. Su importancia se ha reconocido por el Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería (CACEI). Como experiencia práctica la inclusión de este recurso en las materias del plan de estudios es importante en el currículo de nuestros alumnos de nivel licenciatura. En este trabajo se describe el desarrollo y pruebas de un módulo de laboratorio portátil, diseñado para complementar la formación de los estudiantes en las materias de: Programación, Métodos Numéricos, Dinámica de Sistemas, Control y Control Digital.

El comportamiento de un sistema dinámico se encuentra condicionado por las acciones que se ejerzan sobre el mismo. Esas acciones pueden ser ejercidas como acciones deseadas, a través de variables manipuladas o no manipuladas directamente. Los efectos de esas acciones se reflejan en las variables del sistema que bajo ciertas condiciones se desea mantener en un valor determinado. El desafío actual es el modelado y control, interrelacionados, de sistemas modernos y complejos, tales como el control de tráfico, procesos químicos, biológicos, epidémicos y sistemas robóticos (Dorf y Bishop, 2007).

Para controlar los sistemas dinámicos es necesario conocer y comprender su funcionamiento. Una de las vías que permite llegar a dicha comprensión es el modelado matemático a través de ecuaciones diferenciales. Para el control de los sistemas, existen otros tipos de metodologías como el control fuzzy y el control óptimo y se utilizan como alternativas a los controladores clásicos y modernos con el fin de lograr un mejor desempeño.

Los sistemas de control se han consolidado como una herramienta útil en el tratamiento y modelación de sistemas complejos y no lineales que presentan fenómenos como puntos de equilibrio, ciclos límite, bifurcaciones y análisis de estabilidad.

El aeropéndulo es un ejemplo de sistema no lineal y requiere de aplicaciones de control que le permitan posicionarse a un ángulo deseado, cabe señalar que este instrumento cuenta con un motor como masa en el extremo final de una barra con longitud L de donde parte su dinámica no lineal.

El objetivo es diseñar, modelar y simular tres tipos de control: PID, CEV y FUZZY bajo rendimientos mejorados de poca incertidumbre proporcionando mejores resultados en comparación con estudios similares donde se analizan el modelo matemático para su correcta función en realimentación lineal y no lineal (Enikov y Campa, 2012), análisis de estabilidad con parámetros no lineales subordinado al control digital retardado (Habib y cols, 2015) y otras donde se enfocan solo en el control FUZZY (Farooq y cols, 2015). En este trabajo de investigación, se analizan y se comparan los tres controles a fin de conocer el más ideal para controlar la posición angular del aeropéndulo mejorando el rendimiento de la estabilidad.

El control clásico sólo puede tener una entrada y una salida (SISO) por lo que su uso en los puntos de operación se ve limitado en un sistema no lineal. En cambio, el control moderno tiene mayor precisión ya que está limitada por la complejidad de los cálculos que requiere.

Sin embargo el control FUZZY proporciona una manera simple de controlar el sistema, debido a la capacidad de tomar decisiones y en base a ellas regir al mecanismo.

Los tres controles antes mencionados presentan metodologías diferentes con el propósito de posicionar el ángulo deseado del aeropéndulo. Para lograr el objetivo se aplica un modelo matemático linealizado para el control PID y el control de estructura variable ya que estas dos pertenecen a la familia de sistemas lineales a diferencia del control fuzzy perteneciente a los no lineales (Lee, 1990).

Este tipo de estudio permite a los estudiantes una experiencia práctica en aplicaciones de control tales como estabilidad de sistemas, análisis de tiempo muerto, tiempo de subida, overshoot, mediciones así como para propósitos de entretenimiento permitiendo desarrollar y ampliar conocimientos en el área de mecatrónica.

Metodología

El sistema del Aeropéndulo, como el que se muestra en la Figura 1, es de orden superior, no lineal. Es un excelente sistema para llevar a cabo pruebas para diversas técnicas de control y las teorías de control moderno.

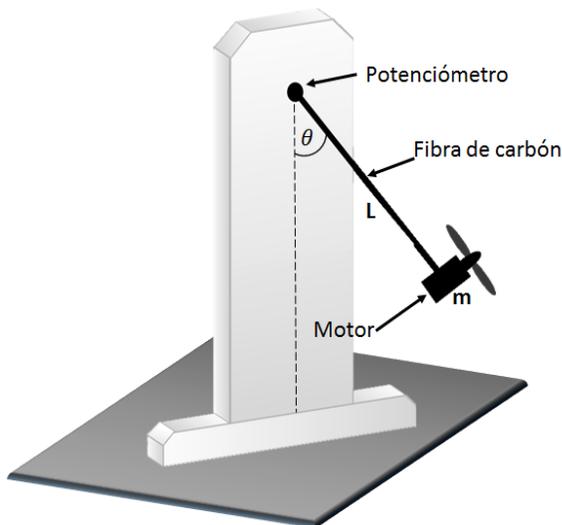


Figura 1 Representación esquemática del aeropéndulo

Modelación matemática

Para obtener el modelo matemático del sistema se requiere aplicar la ecuación de Euler-Lagrange. La ecuación que describe al aeropéndulo tomaría la siguiente forma:

$$mL^2\theta'' = -mgL\sin\theta - c\theta' + kLu \quad (1)$$

Donde se consideran los siguientes datos:

mg: Peso del motor

c: Constante de fricción

θ : Ángulo de desplazamiento

L: Longitud del aeropéndulo

u: Valor de la señal PWM

K: Indica la conversión de la señal PWM en una fuerza de empuje.

Con el modelo matemático (1) el sistema tiene una banda muerta, es decir, para valores PWM pequeños el péndulo no se mueve, para ello se toman en cuenta otros parámetros como el desplazamiento horizontal u_0 y la pendiente $s = \frac{mg}{k}$ con el fin de corregir el modelo y redefinir la señal de control de manera que el término no lineal $\sin(\theta)$ y la banda muerta se cancelen (Enikov y Campa 2012).

$$mL^2\theta'' + c\theta' = KL\tilde{u} \quad (2)$$

Ahora que el modelo se volvió lineal es posible representarlo como una función de transferencia.

$$G(s) = \frac{kL}{mL^2s^2 + cs} \quad (3)$$

En la Figura 2 se muestra la función de transferencia en diagrama de bloques en Simulink.

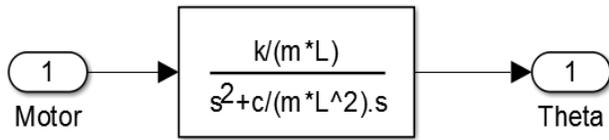


Figura 2 Sistema en función de transferencia del aeropéndulo en SIMULINK

Para este trabajo se consideran los siguientes datos del sistema (1), los cuales se muestran en la Tabla 1.

Parámetro	Descripción	Valor
k	Coefficiente de conversión de la señal PWM en una fuerza de empuje	0.08
c	Constante de fricción	0.009013
L	Longitud del aeropendulo	0.26
m	Masa	0.035
g	Constante de gravedad	9.81

Tabla 1 Parámetros del sistema (1)

Diseño de los controladores para el aeropéndulo

Un control PID es un mecanismo de control por realimentación, donde parte de su función es calcular el error entre un valor medido y un valor deseado debido a su algoritmo que consiste en enfocarse sobre el error con tres parámetros distintos; el primer parámetro es el proporcional donde se da una señal de control proporcional al error; el segundo es el integral, mediante ésta se eliminan errores en estado estacionario y el tercero es el derivativo quien puede anticipar el futuro del comportamiento de la señal de error. Este controlador se expresa matemáticamente por la ecuación 4 (Ogata, 2010).

$$u(t) = kp \left(e(t) + \frac{1}{Ti} \int_0^t e(\tau) d\tau + Td \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (4)$$

En la Figura 3 se ilustra los componentes básicos de un sistema PID.

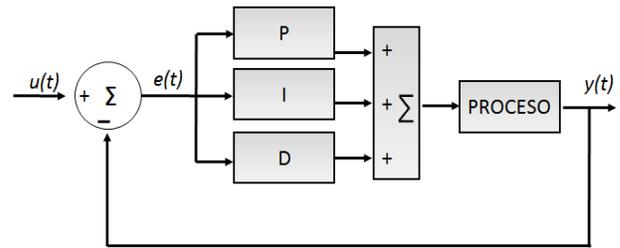


Figura 3 Esquema general del control PID

De acuerdo a la figura es fácil observar que el error pasa por los 3 parámetros antes de llegar al proceso y existe una realimentación que lo convierte en un sistema de control de lazo cerrado.

Tras pruebas realizadas se encontraron los valores ideales de los parámetros PID (Tabla 2) los cuales son los siguientes:

Parámetro	Descripción	Valor
kp	Constante proporcional	0.47
ki	Constante integral	0.1
kv	Constante derivativo	0.3
slope	Pendiente	79
u	Señal de PWM	33

Tabla 2 Parámetros del controlador PID

El diseño del control PID en Simulink queda como se muestra en la Figura 4.

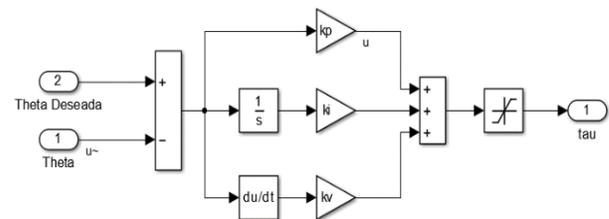


Figura 4 Diseño de controlador PID en Simulink

Para el Control de Estructura Variable (CEV) se aplica la técnica de ubicación de los polos del sistema en lazo cerrado por retroalimentación de estados. Primero se simplifica las ecuaciones diferenciales del sistema, específicamente en su orden mayor o igual a dos.

En la Figura 5 se ilustra la estructura general de un sistema de control CEV.

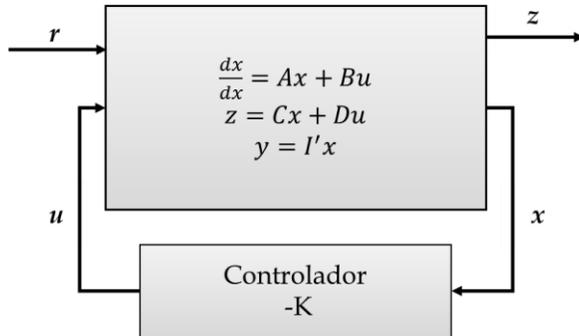


Figura 5 Esquema general del control CEV

Se puede observar que la dinámica de este control es trabajar con variables de estado y asignación de polos, por lo tanto despejando θ de (2).

$$\theta'' = \frac{K}{mL} \tilde{u} - \frac{c}{mL^2} \theta' \quad (5)$$

Se realiza el cambio a variables de estado y sustituyéndolas en (5) se obtiene:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (6)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{K}{mL} \tilde{u} - \frac{c}{mL^2} x_2 \quad (7)$$

Debidamente se busca un sistema linealizado de la forma:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (8)$$

Y haciendo los cálculos se encuentra la matriz A y el vector B equivalentes a:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{c}{mL^2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k}{mL} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Así el modelo lineal del aeropéndulo se puede expresar como:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{c}{mL^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k}{mL} \end{bmatrix} u \quad (11)$$

Ahora usaremos el esquema de control mediante retroalimentación de estados

$$u = -kx \quad (12)$$

Sustituyendo los valores numéricos de la matriz A y el vector B en la matriz de controlabilidad M

$$M = [B \ AB] \quad (13)$$

Y calculando la ecuación característica del sistema dada por

$$|I\lambda - A| = \lambda^2 + 3.8094\lambda \quad (14)$$

Encontramos el valor de a_1 y a_2

$$a_1 = 3.8094 \text{ y } a_2 = 0 \quad (15)$$

Seguidamente para la selección de los polos se utilizarán las propuestas de donde los polos estables están localizados en:

$$\mu_{1,2} = -2.8 \pm 1 * i \quad (16)$$

Y como la ecuación característica del sistema está dada por:

$$(\lambda - \mu_1)(\lambda - \mu_2) = \lambda^2 + 5.6\lambda + 8.84 \quad (17)$$

de donde

$$b_1 = 5.6 \text{ y } b_2 = 8.84 \quad (18)$$

Sabemos que el vector de ganancias por retroalimentación deseado, es dado como:

$$K = [b_2 - a_2 \quad b_1 - a_1] T^{-1} \quad (19)$$

donde T y W están dados por:

$$T = MW \tag{20}$$

$$W = \begin{bmatrix} a2 & a1 \\ a1 & 0 \end{bmatrix} \tag{21}$$

Entonces sustituyendo los valores numéricos y haciendo los cálculos correspondientes se obtiene la señal de control de la matriz K.

$$K=[1.0055 \quad 0.2037] \tag{22}$$

De esta manera se puede representar el control CEV en Simulink (Figura 6) utilizando la técnica por realimentación de estados y asignación de polos con los siguientes datos ver Tabla 3:

Parámetro	Descripción	Valor
U1	Polo 1	-2.8+i
U2	Polo 2	-2.8-i
slope	Pendiente	79
u	Señal de PWM	33

Tabla 3 Parámetros del controlador CEV

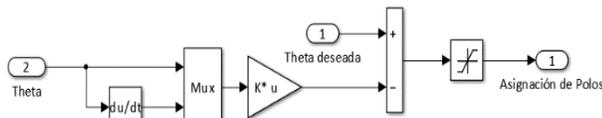


Figura 6 Diseño de control CEV en Simulink

Y para el control fuzzy a diferencia de los anteriores, ésta no necesita un modelo matemático debido a que no requiere identificar el sistema. Generalmente se pueden clasificar en dos tipos: Mamdani y Takagi-Sugeno (Wang, 1994). La principal diferencia entre estos controladores radica en la consecuencia de las reglas. Para el controlador tipo Mamdani, esta consecuencia es un conjunto difuso y para el tipo Takagi-Sugeno es una función lineal de las entradas. En este trabajo se utiliza el tipo Mamdani donde las reglas difusas IF-THEN son de la forma siguiente:

$$R^{(L)}: \text{IF } u_1 \text{ is } F_1^L \text{ AND } u_2 \text{ is } F_2^L \text{ AND } \dots \text{ AND } u_p \text{ is } F_p^L \text{ THEN } v \text{ is } G^L \tag{23}$$

El controlador difuso se compone principalmente de cuatro elementos, los cuales se agrupan en el sistema que se muestra en la Figura 7, y que a continuación se describen (Passino and Yurkovich, 1998):

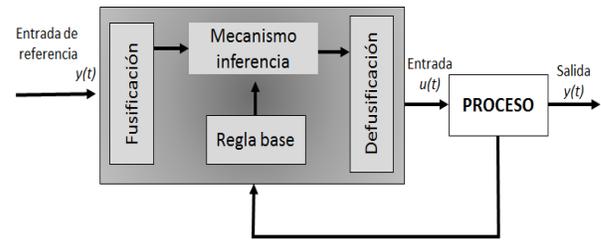


Figura 7 Esquema general de un controlador FUZZY

Una Base-Regla que contiene la lógica difusa exhibiendo una descripción lingüística de un experto con el fin de lograr un control deseado. Un mecanismo de inferencia que emula la decisión del experto en la interpretación y aplicación de conocimientos sobre el control ideal del proceso. Su comportamiento dinámico es en general caracterizado por un conjunto de reglas difusas. Una interfaz de fusificación, que convierte las variables de entrada del controlador en la información que el mecanismo de inferencia pueda usar para activar y aplicar las reglas. Una interfaz de defusificación, que convierte las conclusiones del mecanismo de inferencia en la salida real para el proceso.

Se diseña el control fuzzy del aeropéndulo para que opere tal y como lo haría un experto quien decide en base a reglas lingüísticas la aproximación de la función mediante la relación de entradas y salidas del sistema. Como variables de entrada se usa el error, su derivada y su integral y como variables de salida se utilizan diferentes voltajes para cada entrada, por lo tanto se tiene 3 entradas y 3 salidas con sus respectivas variables lingüísticas representadas como se muestra en la Tabla 4.

		Variables	Términos
Entradas	Error_P Error_I Error_D	Eng	Error negativo grande
		Enp	Error negativo pequeño
		Evc	Error cero
		Epp	Error positivo grande
		Epg	Error positivo grande
Salidas	VOLTP	Kpp	Voltaje proporcional pequeño
		Kpm	Voltaje proporcional medio
		Kpg	Voltaje proporcional grande
	VOLT I	Kip	Voltaje integral pequeño
		Kim	Voltaje integral medio
		Kig	Voltaje integral grande
	VOLTD	Kvp	Voltaje derivativo pequeño
		Kvm	Voltaje derivativo medio
		Kvg	Voltaje derivativo grande

Tabla 4 Variables y términos lingüísticos del control Fuzzy

Así, mediante la relación de entradas (error) y salidas (voltaje) se procede a modelar el control en base a reglas lingüísticas IF-THEN, donde la lógica difusa usa un grado de pertenencia o membresía en forma triangular y trapezoidal tal y como se muestra en las Figuras 8 y 9.

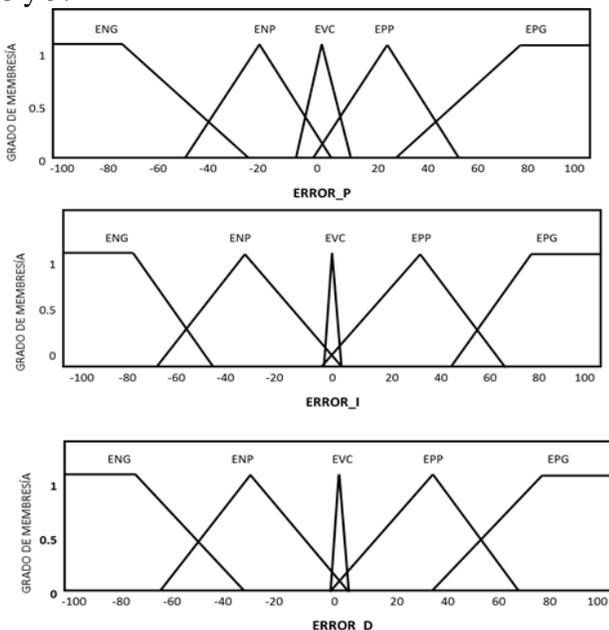


Figura 8 Funciones de membresía de las entradas de error proporcional, error derivativo y error integrativo

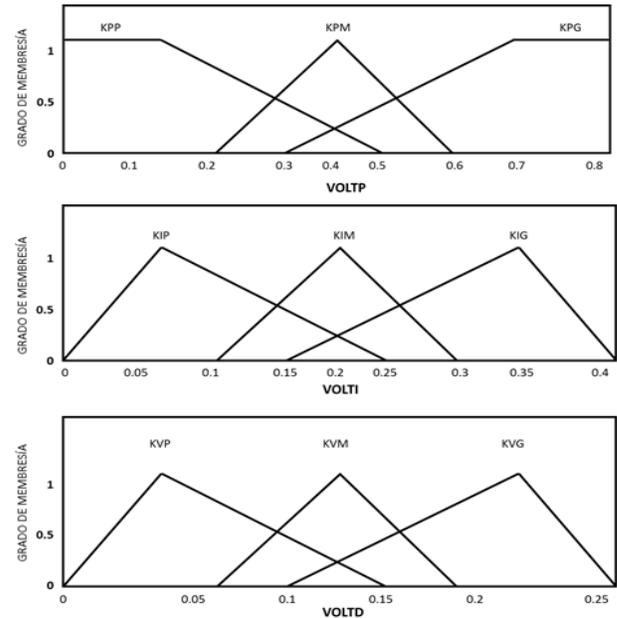


Figura 9 Funciones de membresía de las salidas de voltaje de cada una de las entradas de error

Dado los valores lingüísticos para las entradas y salidas, en la Tabla 5 se presentan el conjunto de reglas que definen el funcionamiento del controlador cuya función principal es modelar la información en 5 reglas simplificadas como se presenta a continuación:

- R1: If (Error_P is ENG) and (Error_I is ENG) and (Error_D is ENG) then (VOLTP is KPG) (VOLT I is KIG) (VOLTD is KVG)
- R2: if (Error_P is ENP) and (Error_I is ENP) and (Error_D is ENP) then (VOLTP is KPM) (VOLT I is KIM) (VOLTD is KVM)
- R5: if (Error_P is EVC) and (Error_I is EVC) and (Error_D is EVC) then (VOLTP is KPP) (VOLT I is KIP) (VOLTD is KVP)
- R3: if (Error_P is EPP) and (Error_I is EPP) and (Error_D is EPP) then (VOLTP is KPM) (VOLT I is KPG) (VOLTD is KVM)
- R4: if (Error_P is EPG) and (Error_I is EPG) and (Error_D is EPG) then (VOLTP is KPG) (VOLT I is KPG) (VOLTD is KVG)

	VOLT_P			VOLT_I			VOLT_D		
ERROR P I D	KPP	KPM	KPG	KIP	KIM	KIG	KVP	KVM	KVG
ENG			KPG R1			KIG R1			KVG R1
ENP		KPM R2			KIM R2			KVM R2	
EVC	KPP R3			KIP R3			KVP R3		
EPP		KPM R4			KIM R4			KVM R4	
EPG			KPG R5			KIG R5			KVG R5

Tabla 5 Reglas para controlar el aeropéndulo

El diseño del control fuzzy en simulink queda como se muestra en la Figura 10.

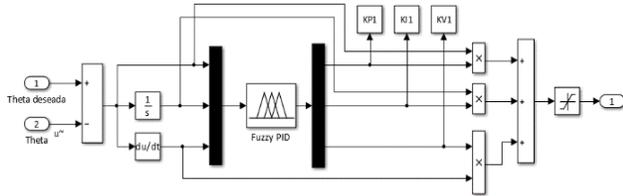


Figura 10 Diseño de control fuzzy en Simulink.

Resultados

Finalmente el sistema general del aeropéndulo se representa como se muestra en la Figura 11 donde tiene la etapa de control PID, CEV y FUZZY, la planta, la etapa virtual y el conversor después de la entrada y antes de la salida. Cabe señalar que la simulación fue con datos reales del prototipo del aeropéndulo.

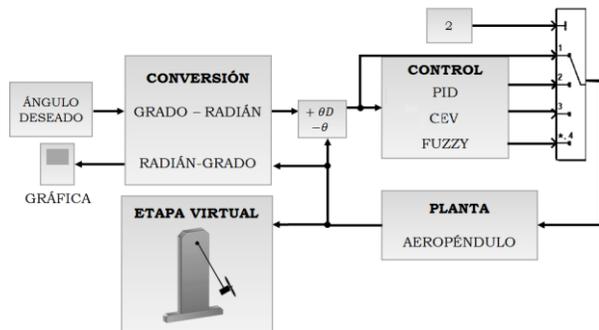


Figura 11 Esquema general del sistema de aeropéndulo

En la Figura 12 se muestra el diseño hecho en simulink queda como sigue:

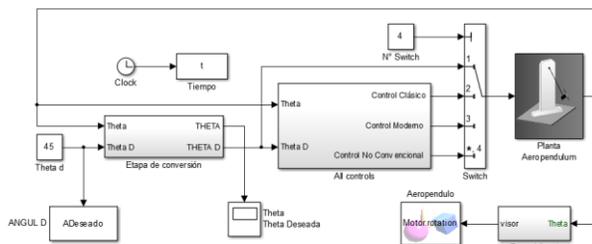


Figura 12 Sistema del aeropéndulo aplicado 3 controles y con simulación virtual en Simulink

Diseño de la etapa virtual del aeropéndulo

En la Figura 13 se muestra el comportamiento virtual del aeropéndulo que previamente fue diseñado en el software SolidWork y guardado con el nombre de Aeropendulum con extensión .wrl para posteriormente extraerlo desde Simulink dentro del bloque VR SINK donde se declara que el motor tendrá movimiento rotacional. La simulación se hace con un parámetro de tiempo de 0.01.

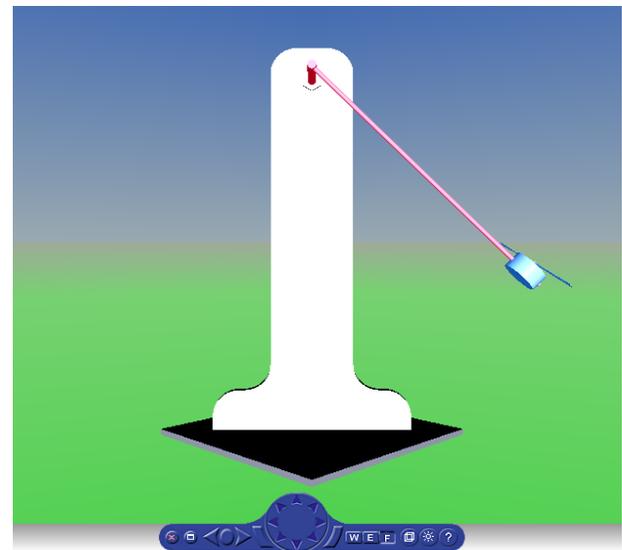


Figura 13 Simulación virtual del aeropéndulo

Comportamiento de la respuesta del aeropéndulo

A continuación se ilustra el comportamiento de la respuesta del aeropéndulo en simulación virtual (Gráfico 1) y real (Gráfico 2) dada una señal de referencia de ángulo a 45° en un tiempo de 10 segundos.

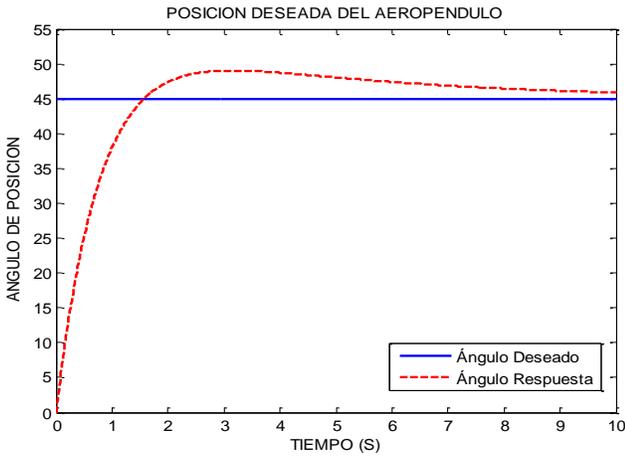


Gráfico 1 Gráfica de la posición deseada del aeropéndulo con sistema de control PID en simulación virtual

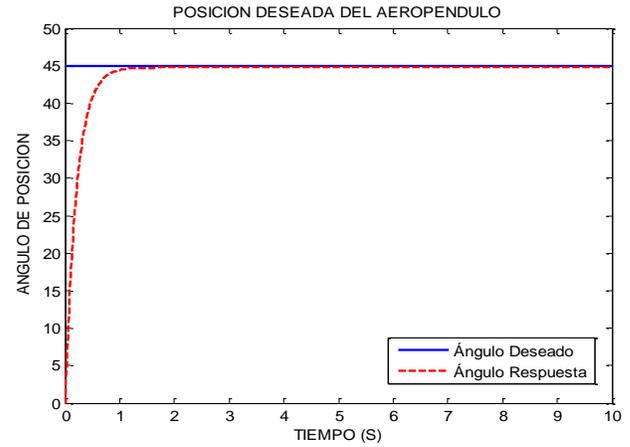


Gráfico 3 Gráfica con sistema de control CEV en simulación virtual

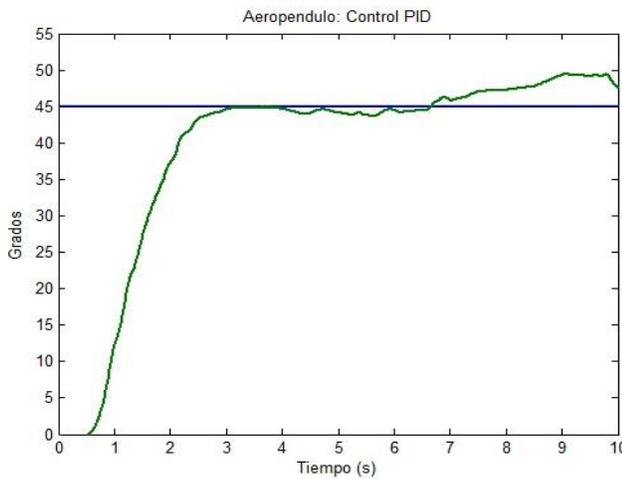


Gráfico 2 Gráfica de la posición deseada del aeropéndulo físico con sistema de control PID en simulación real

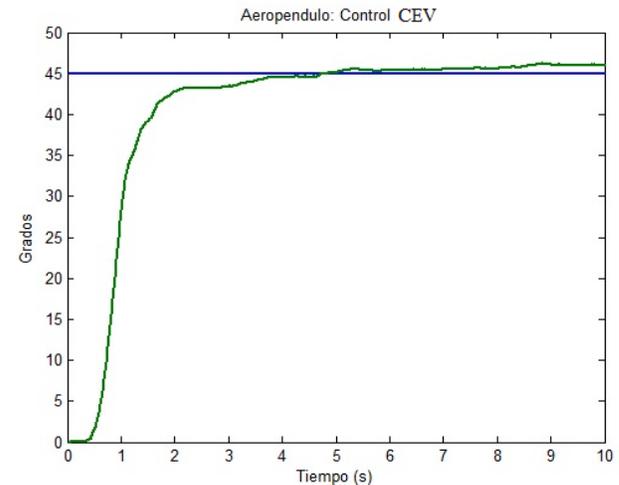


Gráfico 4 Gráfica con sistema de control CEV en simulación real

Para ver el comportamiento de la respuesta del aeropéndulo con control CEV en simulación virtual y real, en los Gráficos 3 y 4 respectivamente, se ilustran la gráfica dada una señal de referencia de 45° en un tiempo de 10 segundos.

Seguidamente se ilustra el comportamiento virtual (Gráfico 5) y real (Gráfico 6) del comportamiento de respuesta del aeropéndulo aplicándole control Fuzzy dada una señal de referencia de ángulo a 45° en un tiempo de 10 segundos.

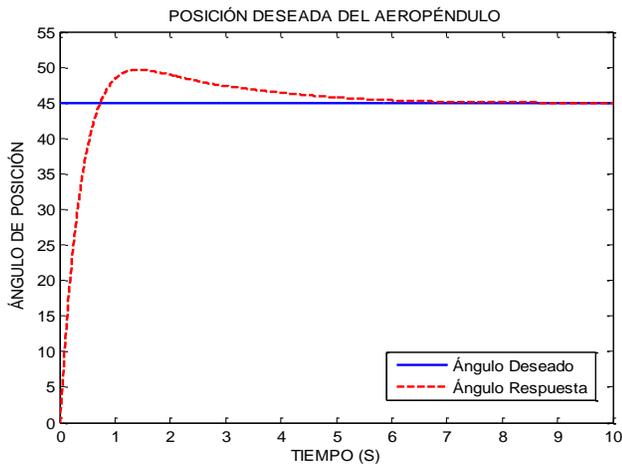


Gráfico 5 Gráfica de la posición deseada del aeropéndulo con sistema de control FUZZY en simulación virtual

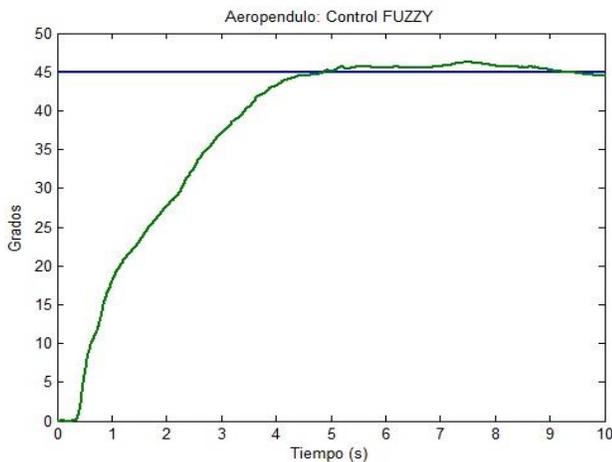


Gráfico 6 Gráfica de la posición deseada del aeropéndulo con sistema de control FUZZY en simulación real

En este análisis se muestran los resultados de los tres diferentes controladores control PID, control FUZZY y un control CEV para un sistema aeropéndulo, el cual es representado por un modelo no lineal. Sin embargo para la simulación del sistema virtual se utiliza un modelo lineal (ecuación 3).

En ambos casos se obtiene el comportamiento dinámico del sistema con una entrada escalón unitario dada como una señal de referencia de ángulo a 45° en un tiempo de 10 segundos, para los tres controladores:

En el primer caso, la del controlador PID, la respuesta obtenida muestra que el sistema virtual responde lento y un mayor tiempo de asentamiento. Para el sistema del aeropéndulo como se ha mencionado es un sistema no lineal responde con unas variaciones al ángulo deseado, debido a que el sensor de posicionamiento es muy susceptible a pequeñas perturbaciones.

En el segundo caso se compara la respuesta del controlador CEV; de donde la respuesta del sistema virtual y real es sin sobrepaso y menor tiempo de establecimiento. En el tercer caso, la del controlador FUZZY, la respuesta obtenida muestra que el sistema virtual responde rápido pero con un sobrepaso menor que la del controlador PID. Para el sistema real la respuesta es lenta posicionándose al ángulo deseado sin dificultades.

En los tres casos se puede notar que las respuestas del sistema virtual y real es mucho mejor para el caso del controlador CEV y FUZZY, debido que ofrecen menor tiempo de establecimiento y mejor rapidez por lo que ambos controladores son una buena opción para este sistema no lineal.

Agradecimiento

Los autores desean expresar su agradecimiento a la carrera de Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico Superior de Huauchinango por el apoyo y las facilidades para el desarrollo de este trabajo.

Conclusiones

En el diseño, la modelación y simulación de un controlador PID, CEV y FUZZY para un sistema de aeropéndulo se obtienen respuestas aceptables con diferencias de precisión del ángulo deseado.

En base al análisis, el control PID presenta mucha oscilación e impide que el aeropéndulo se estabilice al ángulo de referencia deseado, esta observación pone en desventaja este control para intervenir en el sistema.

En cambio, aplicando el control FUZZY con 5 reglas básicas se obtiene un resultado mejor que el control PID en cuanto al tiempo de respuesta y estabilidad. Por otra parte, el desarrollo y diseño de este tipo de control es más fácil realizarlo cuando se conoce la lógica del sistema.

Empleando el control CEV se puede notar que el tiempo de respuesta y la estabilidad del aeropéndulo respecto al valor de referencia deseado es mejor a comparación de los otros dos sistemas de control.

Por lo tanto el controlador CEV es el más eficaz para el sistema del aeropéndulo en cuanto al tiempo de respuesta y por dar mejor estabilidad al valor de referencia.

Referencias

Dorf R. C., y Bishop R. H. (2007) *Sistemas de Control Moderno*, 10ª Ed., Prentice-Hall.

Enicov, E. T., & Campa, G. (2016). PROYECTO AEROPENDULUM. Obtenido de PROYECTO AEROPENDULUM: <http://aeropendulum.arizona.edu/>

Enikov E. T. y Campa G. (2012). *Mechatronic Aeropendulum: Demonstration of Linear and Nonlinear Feedback Control Principles with Matlab/Simulink Real-Time windows target*. IEEE transactions on education, 55(4), 538-545.

Habib G., Miklós Á., Enikov E. T. y Rega G. (2015). Nonlinear model-based parameter estimation and stability analysis of an aeropendulum subject to digital delayed control. 1-14.

Farooq U., Gu J., El-Hawary Mo. Y Asad M. U. (2015). Regulador de LMI fuzzy basado en observador para la estabilización y control de seguimiento de un aeródulo. *Procedimiento del IEEE 28 Conferencia Canadiense sobre Ingeniería Eléctrica e Informática* Halifax, 1508-1513.

Lee C. C. (1990). *Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller (Part I and II)*, IEEE Trans. On Systems, Man, and Cybernetics, vol. 20, no. 2.

Martins M. C. M y Vellasco M. *Fuzzycom-Componente De Logica Fuzzy*. Conselho Nacional De Desenvolvimento Cientifico E Tecnologico, 1, pp.15.

MathWorks. (2016). Simulink. Obtenido de MathWorks:<https://www.mathworks.com/products/simulink/>

Miyara, F. (2004). *Filtros Ideales*. En F. Miyara, *Filtros Activos* (págs. 8-12). Argentina: Universidad Nacional de Rosario.

Ogata K. (2010). *Ingeniería de control moderno*. Madrid: Pearson educación S.A.

Passino K. M., and Yurkovich S. (1998). *Fuzzy Control*, Addison Wesley Longman, Inc., Menlo Park, California, USA.

Wang L. X. (1994). *Adaptive Fuzzy Systems and Control*, Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall.