

Capítulo 3 Helicóptero didáctico en arquitectura abierta controlado con lógica difusa

Chapter 3 Didactic helicopter in open architecture controlled with fuzzy logic

CHARRE-IBARRA, Saida†*, PÉREZ-CÁRDENAS, Diego, CASTAÑEDA-VILLAFANA, Joanna y ALCALÁ-RODRÍGUEZ, Janeth

Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Electromecánica, Carretera Manzanillo-Barra de Navidad Km. 20.5, El Naranjo, 28860, Manzanillo, Colima, México

ID 1^{er} Autor: *Saida, Charre-Ibarra* / **ORC ID:** 0000-0002-3823-5388, **Researcher ID Thomson:** Q-6851-2018

ID 1^{er} Coautor: *Diego, Pérez-Cardenas* / **ORC ID:** 0000-0003-3683-4069

ID 2^{do} Coautor: *Joanna, Castañeda-Villafaña* / **ORC ID:** 0000-0001-7832-8450

ID 3^{er} Coautor: *Janeth A, Alcalá Rodríguez* / **ORC ID:** 0000-0002-0238-3952

DOI: 10.35429/H.2021.10.45.65

S. Charre, D. Pérez, J. Castañeda y J. Alcalá

*scharre@ucol.mx

J. Gudiño, E. Hernández, S. Charre, J. Alcalá y M. Duran (AA. VV.). *Proyectos de Ingeniería Aplicada, Ciencia y Tecnología*
©ECORFAN- México, 2021.

Resumen

En el presente trabajo se presenta el diseño y construcción de un sistema didáctico en arquitectura abierta, el cual permite la aplicación de diferentes técnicas para controlar parámetros en un helicóptero. Se demuestra el funcionamiento mediante la aplicación de un controlador difuso, cuya función es la de regular la velocidad de los motores ubicados en el prototipo y por medio de la lectura de los sensores del tipo acelerómetro, giroscopio y magnetómetro, posicionarlo en un ángulo de inclinación (cabeceo) o en un ángulo de giro (guiñada) deseado. El algoritmo de control se realizó con la herramienta Fuzzy System Designer incluida en el software LabVIEW.

Helicóptero, Sistema didáctico, Control difuso, Arquitectura abierta

Abstract

This paper presents the design and construction of a didactic system in open architecture, which allows the application of different techniques to control parameters in a helicopter. Operation is demonstrated by the application of a fuzzy controller, whose function is to regulate the speed of the engines located in the prototype and by reading the accelerometer, gyroscope and magnetometer type sensors, position it at an angle of inclination (pitch) or rotation (yaw). The control algorithm was performed with the Fuzzy System Designer tool included in the LabVIEW software.

Helicopter, Didactic system, Fuzzy Control, Open architecture

1. Introducción

Los módulos didácticos forman parte del diseño instruccional de los cursos académicos, utilizándose como un recurso para aprender. Debe proveer y contener herramientas que apoyen a los estudiantes a entender y aprender paso a paso cualquier material contenido en un curso educativo (Guerrero-Hernández et al., 2016). En la actualidad el desarrollo que presentan el software y hardware ha revolucionado también la didáctica, y en este contexto ha tenido lugar la renovación y la introducción de nuevos conceptos enfocados a hacer más flexible, dinámico y creativo el proceso enseñanza aprendizaje en las instituciones educativas (Herrera, Merchán & Villamizar, 2010). Sin embargo, en la mayoría de los casos, en el proceso educativo se utilizan equipos no aptos para cumplir el objetivo.

En el mercado hay empresas dedicadas al diseño y fabricación de equipos didácticos con calidad y garantía, pero sus costos son elevados para ser adquiridos por instituciones educativas; por lo que es importante promover el desarrollo y uso de equipos que cumplan con la filosofía del modelo educativo y sean elaborados en las mismas instituciones educativas (Guevara, et al., 2009).

Por lo que el desarrollo de este proyecto surgió a partir de la observación de las necesidades de la institución educativa a la que pertenecen los autores, relacionadas con equipo didáctico relativo a vehículos no tripulados. Dentro de los no tripulados se incluyen los relacionados con drones y helicópteros de dos y tres grados de libertad. Los Vehículos aéreos no tripulados o UAV (Unmanned Aerial Vehicle) son aeronaves que vuelan sin tripulación humana a bordo; el primero fue desarrollado después de la primera guerra mundial y se empleó durante la segunda guerra mundial (Tovar & Figueroa, 2021).

Con el avance de la tecnología de los microprocesadores y el mejoramiento relacionado con las capacidades de las baterías se ha incrementado el desarrollo de este tipo de vehículos y actualmente se pueden observar en aplicaciones civiles de seguridad, vigilancia, recreativas y educativas (Parra, 2015).

Actualmente se encuentra en el mercado equipo educativo de la marca Quanser (Products & Lab Solutions, s.f.), diseñado para la investigación de control avanzado y aplicaciones aeroespaciales, que se utilizan para enseñar conceptos de control, figura 1.

Figura 1 Plataformas didácticas comerciales



a) Quanser AERO



a) b) 3 DOF Helicopter



c) 3 DOF Hover

Fuente: (Products & Lab Solutions, s.f.)

En 2014, Solaque, Cristancho y Gil hacen una comparación entre un controlador PID y un controlador difuso, aplicados en una plataforma experimental de un grado de libertad que cuenta con diseño y construcción de su autoría, observada en la figura 2, que arroja como resultado en el controlador difuso un tiempo de posicionamiento inferior con respecto al controlador PID.

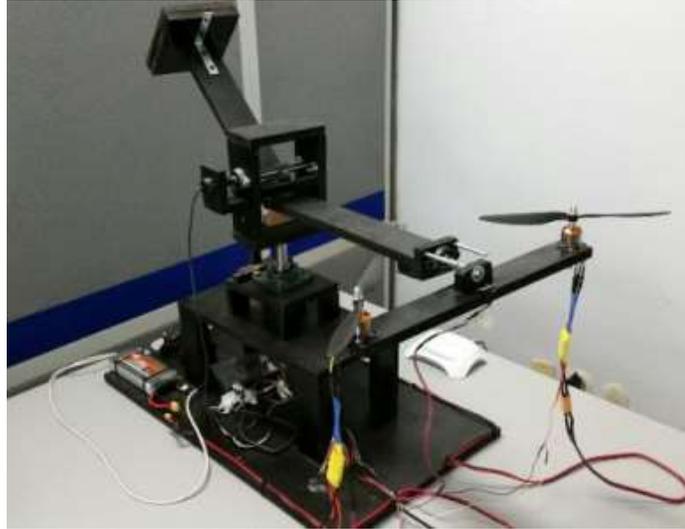
Figura 2 Plataforma experimental tipo helicóptero de un grado de libertad



Fuente: (Solaque, Cristancho, & Gil, 2014)

En la Universidad de Guadalajara diseñaron, construyeron y controlaron aplicando un PID a un helicóptero de tres grados de libertad, figura 3, el cual representa una opción viable y económica para el estudio de algoritmos complejos de control en un sistema dinámico (Brizuela-Mendoza et al., 2019).

Figura 3 Helicóptero de tres grados de libertad



Fuente: (Brizuela-Mendoza, et al., 2019)

Con fundamento en los trabajos anteriormente mencionados se realizó el diseño y construcción del prototipo de un sistema de dos grados de libertad tipo helicóptero, en el que se pueden simular dos de los tres movimientos realizados por un helicóptero real (en este caso cabeceo y guiñada), experimentando con un controlador difuso diseñado en el software LabVIEW™ para el análisis de los resultados.

Sin más, el presente capítulo tiene la siguiente estructura: la sección 2 muestra el diseño y construcción del prototipo, la sección 3 describe el sistema de adquisición de datos, la sección 4 presenta el diseño y programación del controlador difuso para la manipulación del prototipo y, finalmente, la sección 5 muestra los resultados experimentales que corroboran el correcto funcionamiento de la instrumentación del prototipo. La conclusión se presenta en la sección 6.

2. Diseño y construcción del prototipo helicóptero

Un helicóptero es una aeronave que es sustentada y propulsada por uno o más rotores horizontales, cada uno conformado por dos o más hélices.

Los helicópteros se clasifican como aeronaves de alas rotatorias, para distinguirlos de las aeronaves de ala fija (aviones), puesto que los helicópteros obtienen su fuente de sustentación de las hélices que giran alrededor de un eje (Federal Aviation Administration, 2019).

Los helicópteros se clasifican por tipo de configuración, los cuales son:

- Un rotor (Con y sin cola).
- Dos rotores (Tandem, giro lado a lado, giro entrelazado, giro coaxial, etc.).

Cualquier aeronave es capaz de realizar tres posibles giros alrededor de sus ejes que son perpendiculares entre sí y, cuyo punto de intersección está situado sobre el centro de gravedad del avión. Estos tres ejes son el eje lateral (o transversal), el longitudinal y el vertical. Las maniobras principales en dichos ejes se conocen como cabeceo (pitch), alabeo (roll) y guiñada (yaw). Dichas maniobras se describen a continuación y se pueden apreciar en la figura 4.

Figura 4 Movimientos realizados por el helicóptero

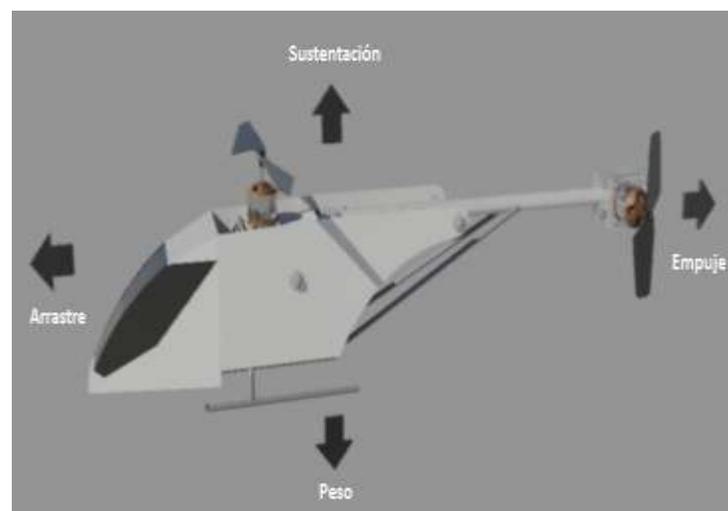
Fuente: Elaboración Propia

Se le conoce como cabeceo al movimiento que realiza la aeronave alrededor de su eje lateral o transversal (eje imaginario que se extiende a lo ancho de la aeronave).

El movimiento que realiza la aeronave alrededor del eje longitudinal (eje imaginario que se extiende desde la cabina hasta la cola de la aeronave) se le denomina alabeo.

Guiñada es el movimiento que realiza la aeronave alrededor del eje vertical, que es el eje imaginario que pasa por el centro de gravedad de la aeronave y es perpendicular a los ejes transversal y longitudinal (Padfield, 2014).

Una vez que un helicóptero despegue, cuatro fuerzas aerodinámicas actúan sobre él, estas son: empuje, arrastre, sustentación y peso. La descripción de dichas fuerzas se menciona a continuación y se pueden apreciar en la figura 5.

Figura 5 Fuerzas aerodinámicas

Fuente: Elaboración Propia

Empuje es la fuerza de avance producida por el poder de las hélices o la oposición del rotor, cuando se supera la fuerza de arrastre. Como regla general, actúa en paralelo al eje longitudinal.

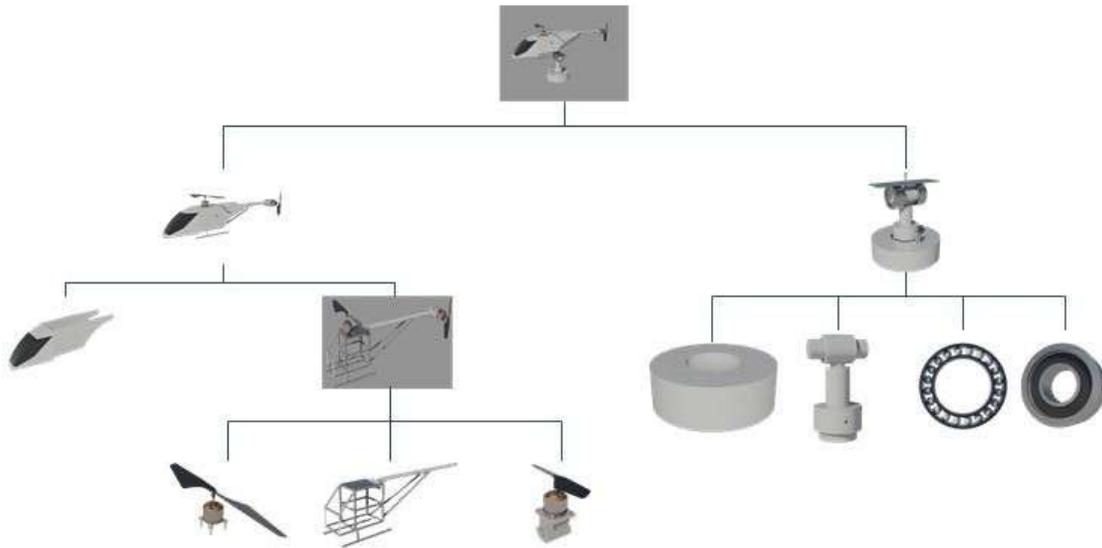
Se le conoce como Arrastre a la fuerza de retardo causada por la interrupción del flujo de aire por el ala, rotor, fuselaje y otros objetos que sobresalgan. Opone empuje y movimientos hacia atrás, paralelo al viento relativo.

El peso es la carga combinada de la propia aeronave, la tripulación, el combustible y la carga o equipaje. El peso jala a la aeronave hacia abajo debido a la fuerza de la gravedad. Se opone a la elevación y actúa verticalmente hacia abajo a través del centro de gravedad de la aeronave.

La sustentación se produce por el efecto dinámico del aire que actúa sobre la superficie de elevación. Actúa perpendicularmente a la trayectoria del vuelo y se opone a la fuerza causada por el peso (Federal Aviation Administration, 2019).

En la figura 6 se desglosan las partes que conforman al prototipo didáctico en arquitectura abierta, el cual se divide en dos partes: el helicóptero y la base giratoria.

Figura 6 Diagrama del prototipo



Fuente: Elaboración Propia

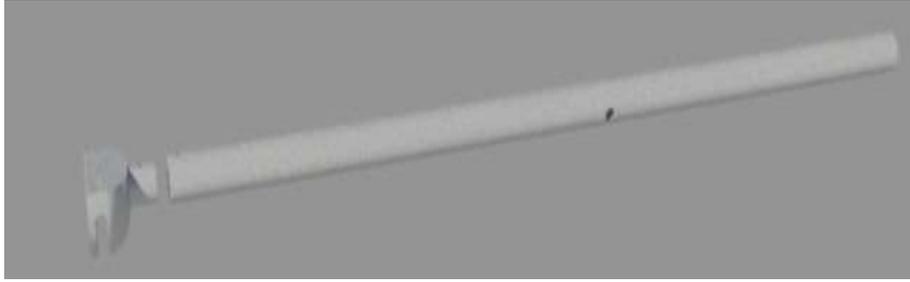
El diseño se basa en el helicóptero Super Puma, de tipo rotor principal y rotor de cola, ver figura 7.

Figura 7 Diseño del helicóptero



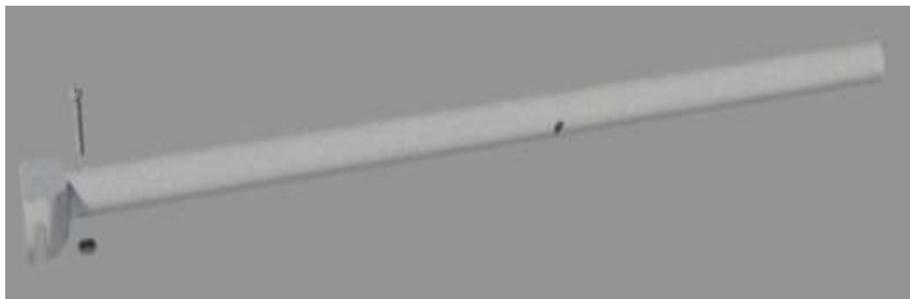
Fuente: Elaboración Propia

La estructura del helicóptero se compone por una pieza tubular, figura 8, que forma una parte de éste, se conoce coloquialmente como cola.

Figura 8 Cola del helicóptero

Fuente: Elaboración Propia

Dicho tubo tiene en uno de sus extremos un acople. El acople se introduce dentro del tubo y se sujeta con la ayuda de un tornillo, como se observa en la Figura 9.

Figura 9 Ensamble de tubo y acople

Fuente: Elaboración Propia

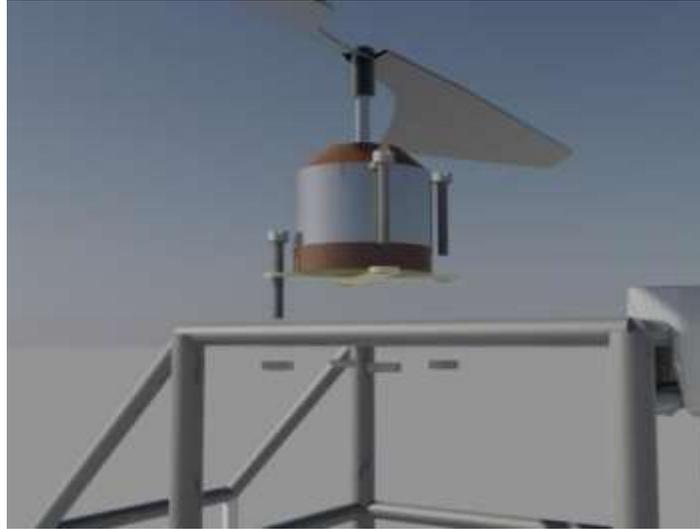
La cabina del helicóptero se diseñó a base de varillas delgadas. El acople anteriormente mencionado cuenta con una ranura en la que se incorpora una de las varillas superiores que conforma la cabina, esto con la finalidad de que la estructura sea desarmable; es así como se une la cola con la cabina y se forma la estructura del helicóptero, véase figura 10.

Figura 10 Ensamble de cola y cabina

Fuente: Elaboración Propia

La cabina del helicóptero cuenta con una placa en la parte superior. En mencionada placa se sujeta el motor principal por medio de cuatro tornillos, esto se puede apreciar en la figura 11.

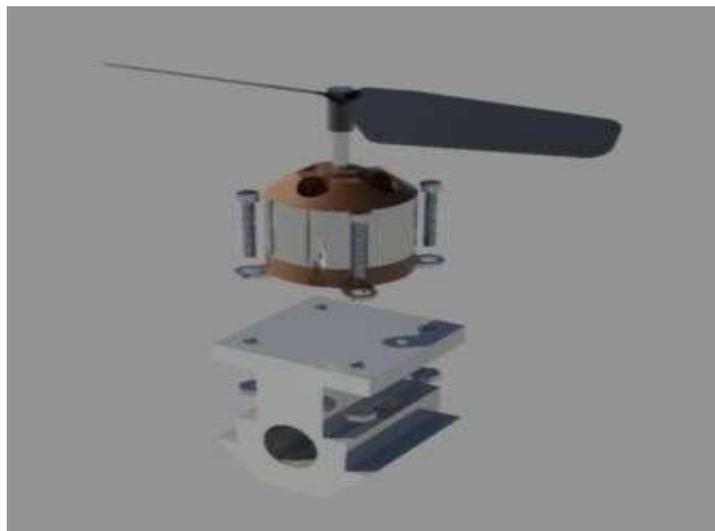
Figura 11 Ensamble de motor principal



Fuente: Elaboración Propia

Para fijar el motor de la cola, éste se monta a una pieza de forma irregular, también con la ayuda de cuatro tornillos como en el caso del motor principal, figura 12.

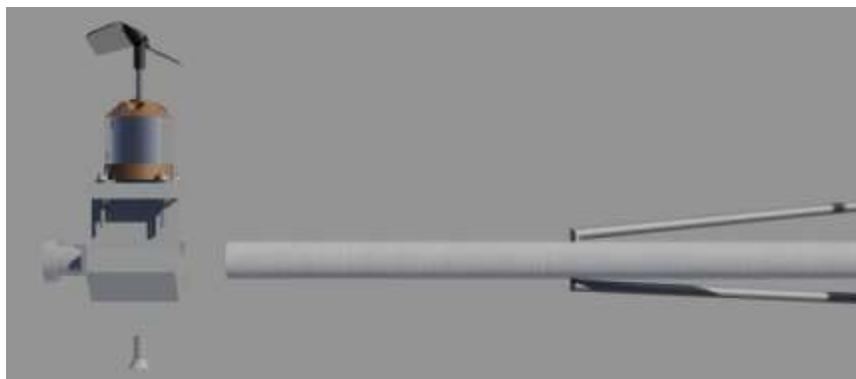
Figura 12 Ensamble de motor principal



Fuente: Elaboración Propia

La pieza que sujeta el motor se inserta al tubo que forma la cola del helicóptero y se asegura con un tornillo, como se muestra en la figura 13.

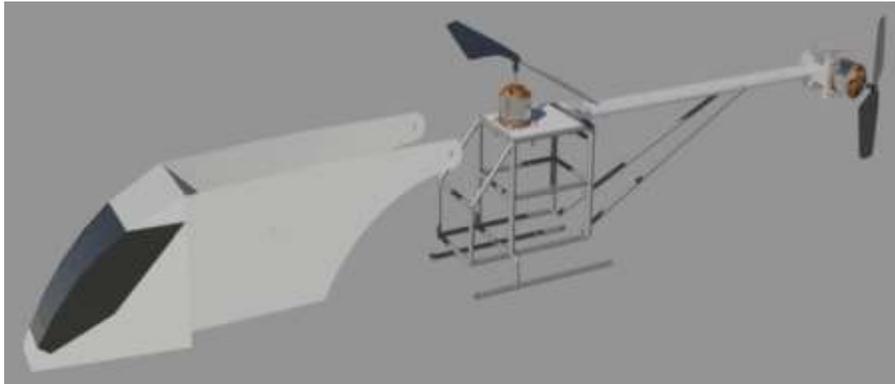
Figura 13 Ensamble de motor a cola de helicóptero



Fuente: Elaboración Propia

Finalmente se coloca una carcasa a la estructura del helicóptero, como se observa en la figura 14.

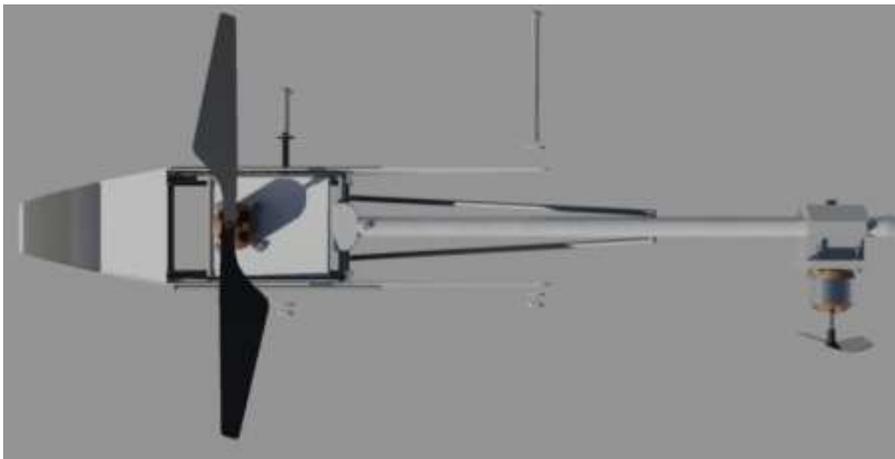
Figura 14 Ensamble de carcasa a helicóptero



Fuente: Elaboración Propia

Para la sujeción de la carcasa a la estructura se utilizan dos tornillos que la atraviesan de lado a lado, figura 15.

Figura 15 Sujeción de la carcasa



Fuente: Elaboración Propia

El diseño de la base giratoria, figura 16, permite al helicóptero moverse en los planos x y y , generando así dos movimientos de un helicóptero real.

Figura 16 Diseño de base giratoria



Fuente: Elaboración Propia

La base está realizada a partir de cilindros de diferentes diámetros y longitudes. Un cilindro de forma horizontal, que cuenta con una perforación, se empotra a otro, que se encuentra de manera vertical, formando así una “T”. A su vez, la parte inferior de dicha “T” se introduce a un balero (esto para que permita un movimiento de giro de 360 grados, conocido como guiñada). El balero se fija a una pieza circular que funciona como pedestal, dando soporte a todo el sistema. Todo esto se puede observar en la figura 17.

Figura 17 Ensamble de la base giratoria



Fuente: Elaboración Propia

Para permitir otro movimiento de giro en 90 grados llamado cabeceo, a la “T” se le fija un balero en cada extremo de su parte superior como se muestra en la figura 18.

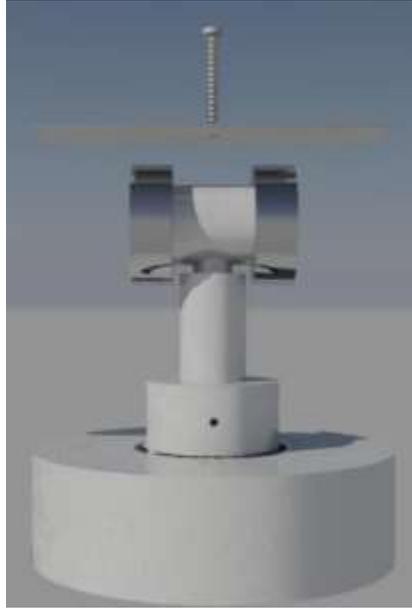
Figura 18 Ensamble de la base giratoria para el cabeceo



Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 19 se observa la colocación de una placa, la cual funciona para montar en helicóptero. Dicha placa se une a los baleros.

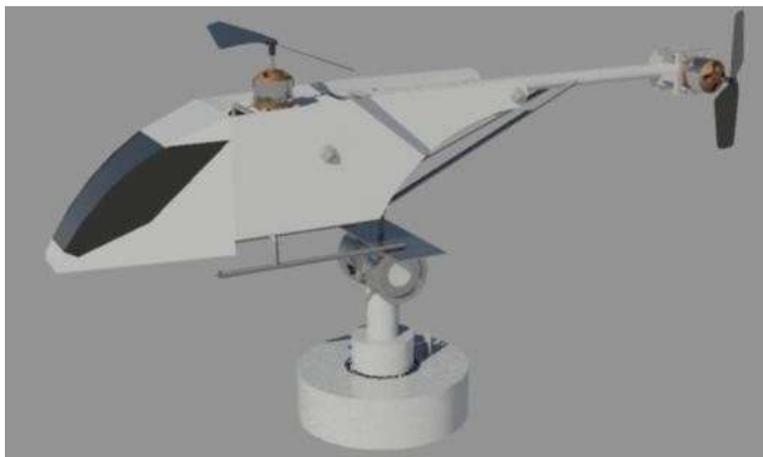
Figura 19 Ensamble de la base para el helicóptero



Fuente: Elaboración Propia

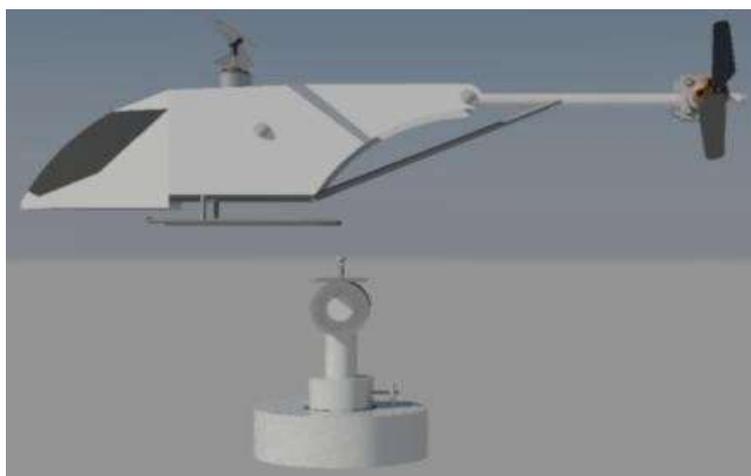
En las figuras 20 y 21 se presenta el prototipo del helicóptero diseñado.

Figura 20 Prototipo del helicóptero



Fuente: Elaboración Propia

Figura 21 Helicóptero y base giratoria



Fuente: Elaboración Propia

3. Sistema de adquisición de datos

Para la adquisición de datos se utiliza el dispositivo myRIO™ y el procesamiento de las señales se realiza en el software LabVIEW™, figura 22.

Figura 22 myRio – Dispositivo embebido para estudiantes

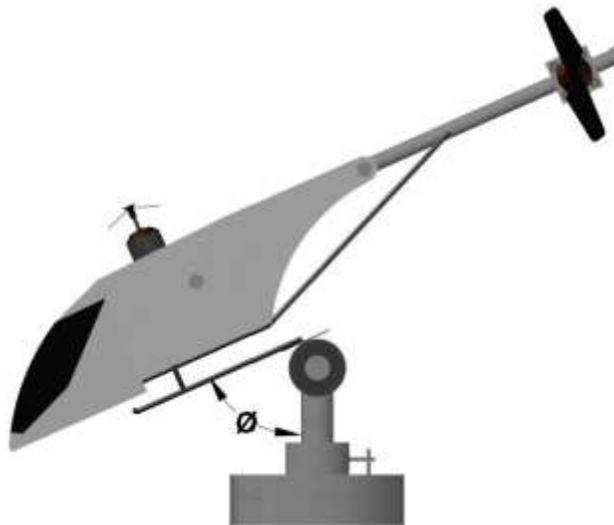


Fuente: (myRIO, s.f.)

También se usan dos sensores para realizar las lecturas de los ángulos, los cuales son: IMU 6050, el cual tiene integrado un giroscopio y un acelerómetro, es el encargado de la medición del ángulo cabeceo (θ), como se muestra en la figura 23; y un sensor HCM5883l, el cual consiste en un magnetómetro, y es el encargado de medir el ángulo guiñada (β), véase figura 24.

Cada sensor se lee a través de uno de los puertos I^2C con los que cuenta el dispositivo myRIO™.

Figura 23 Ángulo de cabeceo

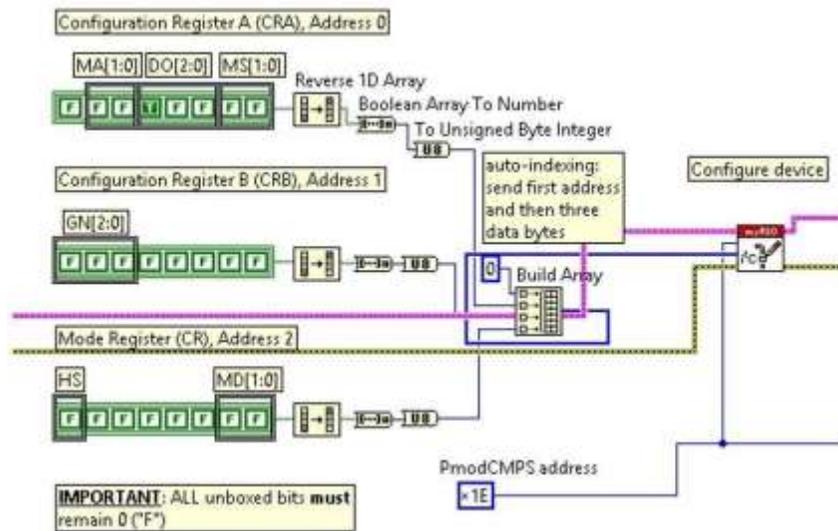


Fuente: Elaboración Propia

Lo siguiente es configurar la velocidad de comunicación, en este caso se realiza mediante del bloque *I²C Configure*.

Una vez abierta la comunicación con el sensor, se debe configurar cada uno de los registros y las demás características de los dispositivos a utilizar, el magnetómetro HCM58831 tiene como dirección *I²C* 0x1E, se opera en modo Continuous-Measurement (continuo), en donde está constantemente realizando mediciones y actualizando los registros x,y,z correspondientes a las lecturas, figura 27.

Figura 27 Configuración de dispositivos



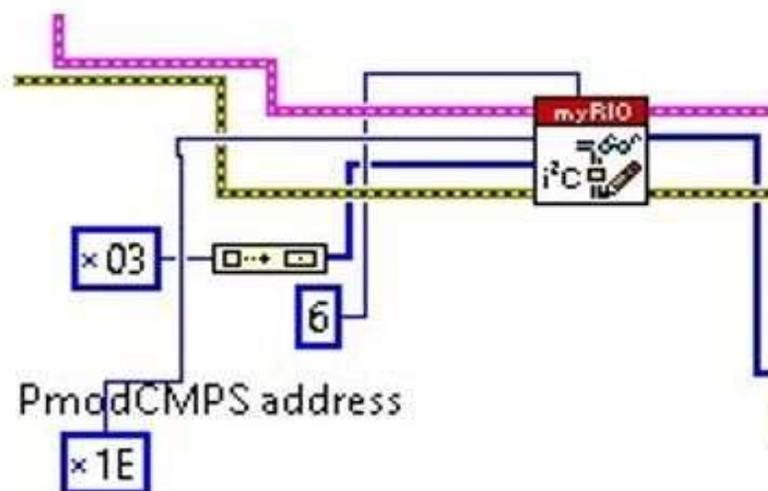
Fuente: Elaboración Propia

En el caso de dicho sensor se necesita la configuración de los registros A y B, así como el modo del registro. Por medio de Arrays se configuran los valores del registro y se ingresan a un bloque *I²C Write*. Una vez realizado lo anterior, la computadora ya tiene completa comunicación con el sensor, lo siguiente es adquirir la señal. En el caso del mismo sensor es obtener de los ejes del mismo, los valores de la interacción del campo magnético con cada uno de ellos.

La lectura del sensor se realiza por medio de un bloque *I²C Read*, al cual es necesario indicar la dirección de este en el dispositivo, así como de ingresar la cantidad de registros a obtener.

Una vez adquiridos los valores se procede a realizar el procesamiento de la señal; debido a que se tienen dos registros para cada valor es necesario unirlos, figura 28, de esta manera se obtienen la lectura de los tres ejes del sensor.

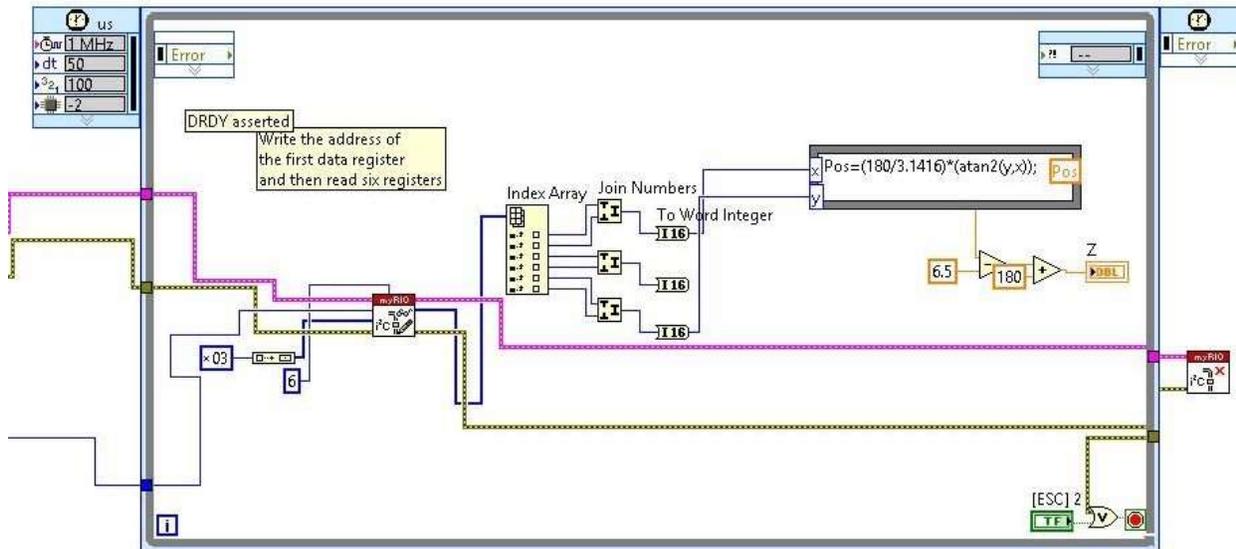
Figura 28 Unión de registros



Fuente: Elaboración Propia

Por último, se utiliza un bloque I^2C Close para terminar la comunicación con el sensor. En la figura 29 se observa el diagrama correspondiente a las etapas de adquisición y procesamiento de la señal.

Figura 29 Diagrama de adquisición y procesamiento de la señal



Fuente: Elaboración Propia

4. Controlador difuso para el helicóptero

El control Inteligente comprende una serie de técnicas, tomadas fundamentalmente de la Inteligencia Artificial, con las que se pretenden resolver problemas de control inabordables por los métodos clásicos (Jiménez, et al., 2000).

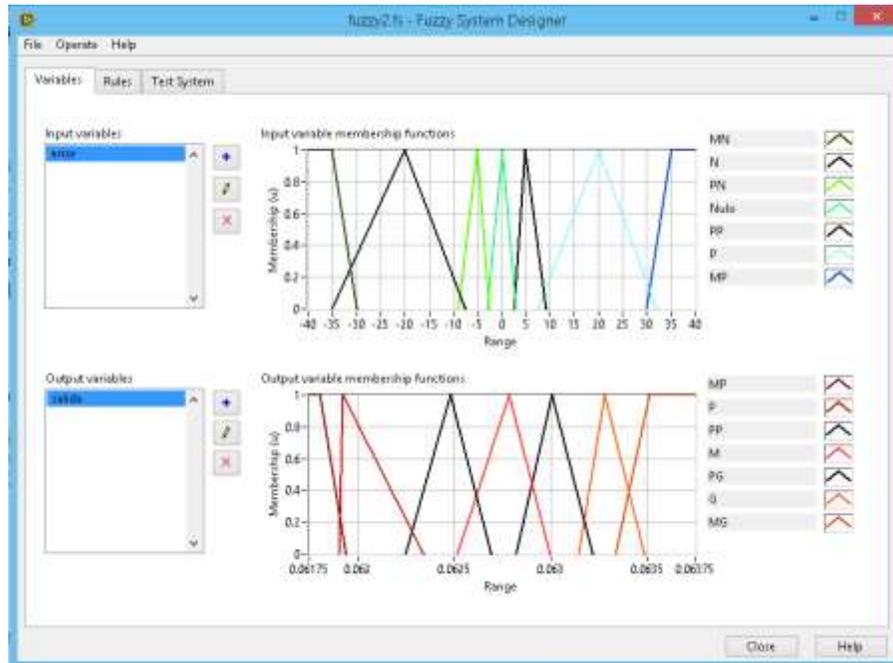
Ponce (2010) afirma que la Lógica Difusa es una rama de la Inteligencia Artificial que le permite a una computadora analizar información del mundo real en una escala entre lo falso y verdadero. Los matemáticos dedicados a la lógica en el año de 1920 definieron un concepto clave: Todo es cuestión de grado, puesto que manipula conceptos vagos como “caliente” o “húmedo” y permite a los ingenieros construir televisores, aires acondicionados, lavadoras y otros dispositivos que juzgan información difícil de definir.

La incorporación de la Lógica Difusa a los sistemas de control da lugar a lo que se conoce como Sistemas Difusos. Estos tipos de sistemas utilizan el conocimiento y experiencia de un operador humano para construir un controlador que emule el comportamiento de tal.

Comparado con el Control Clásico o Tradicional, el Control Difuso cuenta con dos ventajas prácticas, una es que el modelo matemático del proceso a controlar no es requerido y otra es que se obtiene un controlador no lineal desarrollado empíricamente sin complicaciones matemáticas (Bonifacio & Sanz, 2006).

En el presente trabajo se programa el controlador en el software LabVIEW™ con el uso del toolkit Fuzzy System Designer, se ingresan las funciones de pertenencia de la variable de entrada y de la variable de salida. En la figura 30 se observa que para poder ser ingresadas es necesario especificar la forma de la función de membresía, así como los valores que representa. Al ingresar una función se pueden declarar sus valores de dos maneras diferentes, la primera es ingresarlos en los cuadros de texto y la segunda opción es arrastrar los puntos que se tienen en los extremos de las formas de las funciones. Para facilitar su análisis se pueden asignar de forma indistinta distintos colores a cada variable.

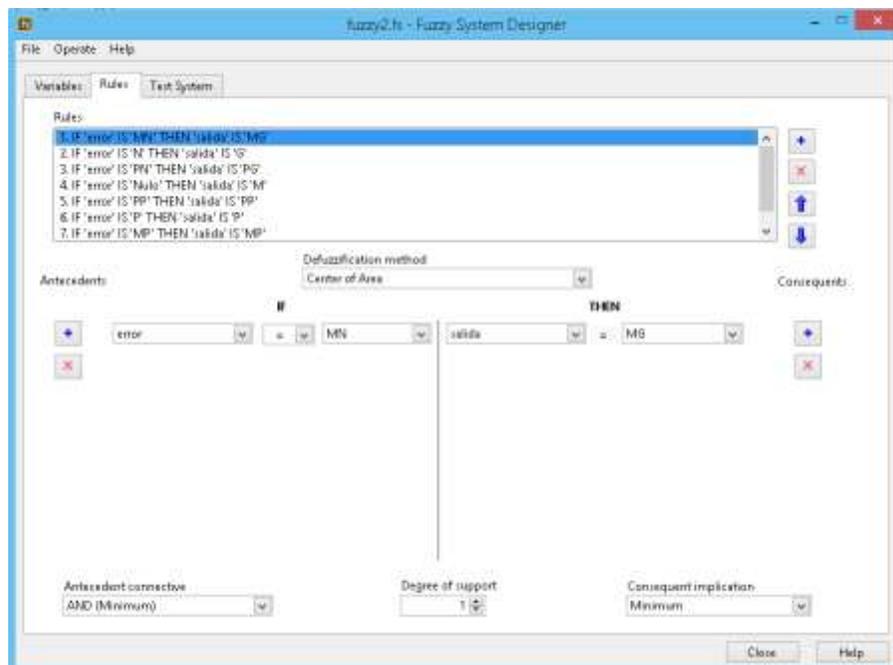
Figura 30 Ventana principal de toolkit Fuzzy System Designer



Fuente: Elaboración Propia

Una vez ingresadas las variables, lo siguiente es añadir la base de reglas, esto se realiza en la pestaña Rules, figura 31, para ingresar una nueva regla se da clic en Agregar, una vez agregada se elige la función de membresía de la entrada así como la función de membresía de salida. De igual manera se elige el Método de Defuzzificación.

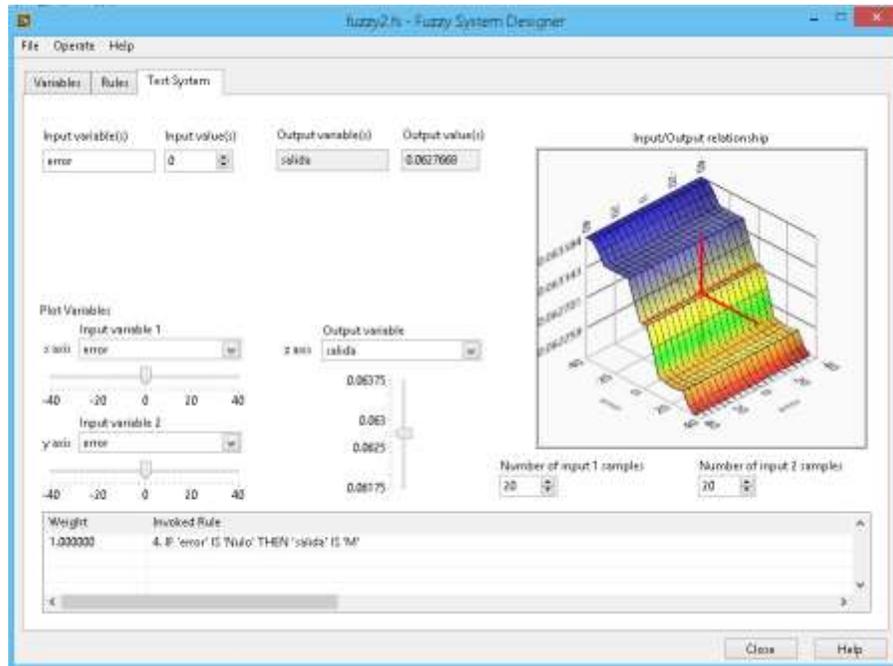
Figura 31 Ventana de edición de reglas



Fuente: Elaboración Propia

Una vez ingresadas las variables y la base de reglas, en la ventana de Test System se puede ingresar un valor de entrada y se muestra el valor que se tendría de salida, de esta forma se puede observar la superficie de control, figura 32.

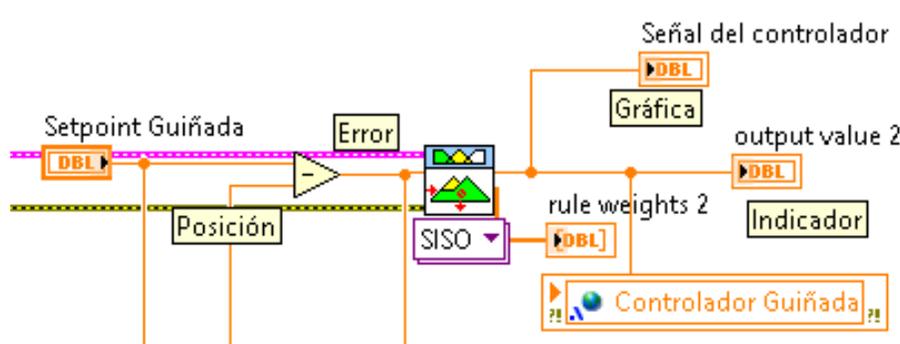
Figura 32 Ventana de Test System



Fuente: Elaboración Propia

Para poder utilizar el controlador es necesario generar la variable de entrada, en este caso en particular se considera como variable de entrada al error. El error se obtiene al restarle la posición actual al Set-point. Una vez que se tiene el error se procede a insertar un bloque *FL Fuzzy Controller*, a la terminal de *Input Value* se le conecta el error, a la terminal de *Fuzzy System In* se le conecta la terminal de *Fuzzy System Out* del bloque de carga del controlador, de igual manera a la terminal *Error In* se le conecta la terminal *Error Out* del bloque anterior. Debajo del bloque del controlador se encuentra una lista desplegable para elegir el tipo de controlador, en este caso se elige la opción Automático, al tener una sola entrada y salida este controlador se dice que es de tipo SISO (Single Input Single Output). La terminal de salida del controlador será conectada a tres bloques, el primero de ellos es la gráfica de la señal del controlador, el segundo es un indicador digital y el tercer bloque es una variable compartida, todo esto se puede apreciar en la figura 33.

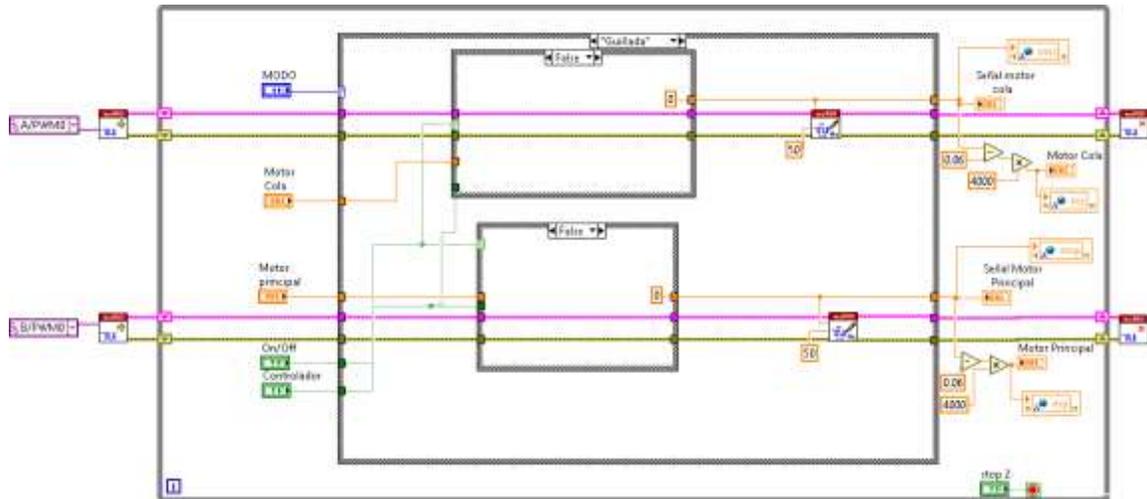
Figura 33 Diagrama de generación de variable de entrada



Fuente: Elaboración Propia

Los valores de salida del controlador son enviados al motor utilizando el diagrama mostrado en la figura 34. En dicho diagrama se observa en la entrada la conexión de dos bloques de inicio de PWM, en cada uno de ellos por medio de una constante. Se elige el puerto PWM a utilizar, en este caso se utilizan dos puertos PWM.

Figura 34 Diagrama de operación modo guiñada



Fuente: Elaboración Propia

5. Resultados

La estructura del helicóptero fue construida con varillas de acero inoxidable unidas mediante el proceso de soldadura por arco eléctrico. La carcasa fue realizada con fibra de vidrio. La estructura real se puede apreciar en la figura 35.

Figura 35 Estructura del helicóptero



Fuente: Elaboración Propia

La base giratoria, mostrada en la figura 36, fue fabricada a partir de perfiles tubulares de aluminio, modificados en un torno convencional.

Figura 36 Base giratoria construida



Fuente: Elaboración Propia

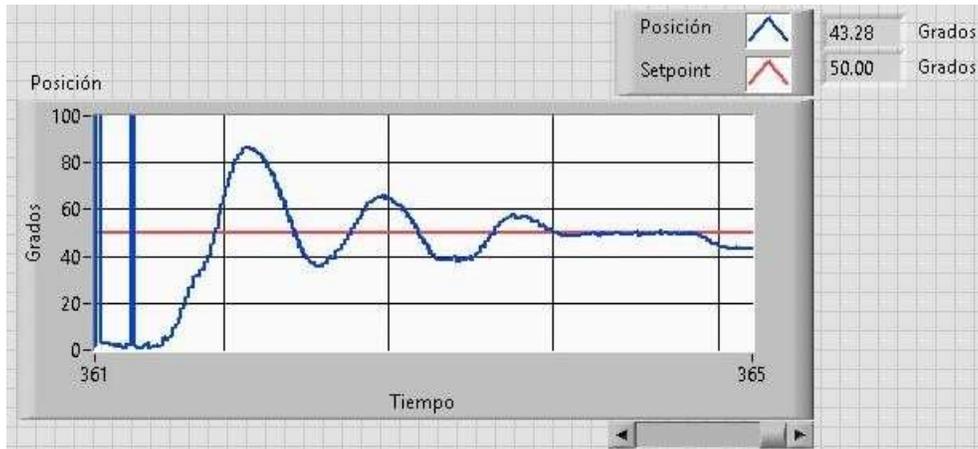
El prototipo final construido se aprecia en la figura 37.

Figura 37 Prototipo final



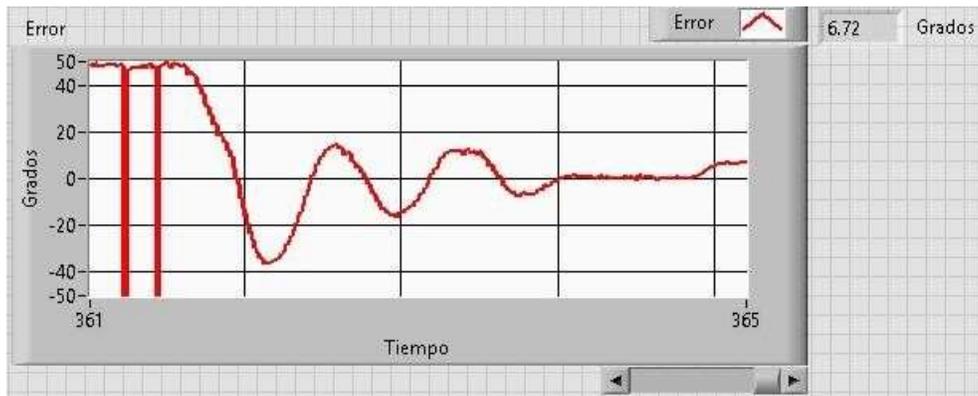
Fuente: Elaboración Propia

Para comprobar la funcionalidad del prototipo construido se realizaron pruebas aplicando el controlador difuso, los resultados obtenidos con un cambio en el set-point de 0 a 50 grados, se muestra en la figura 38, logrando posicionarse en un tiempo inferior a 4 segundos.

Figura 38 Señal del set-point y la posición

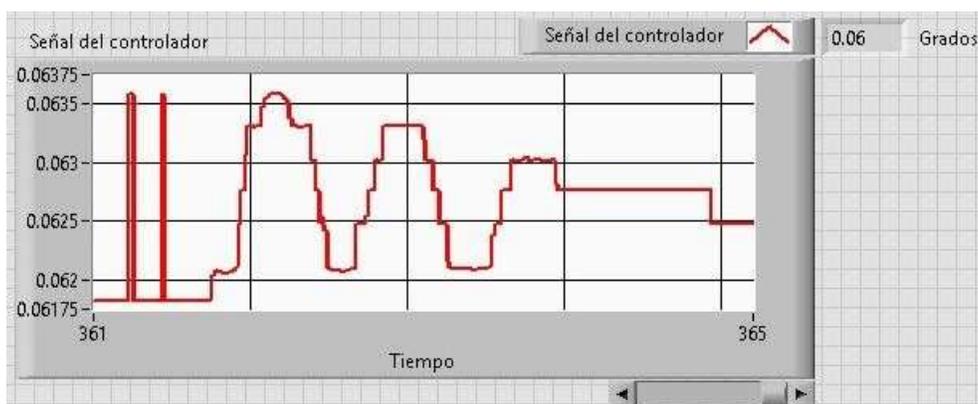
Fuente: Elaboración Propia

En la figura 39 se muestra la señal del error que tuvo el helicóptero durante su posicionamiento, este error es la diferencia de posición deseada contra la posición real.

Figura 39 Señal del error

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 40 se muestra la señal de control aplicada al motor para lograr la posición deseada.

Figura 40 Señal de control

Fuente: Elaboración Propia

6. Conclusiones

En el presente capítulo se presenta el diseño, construcción y control de un helicóptero didáctico en arquitectura abierta. Se evalúa el prototipo a partir de resultados experimentales, cuyo objetivo consiste en confirmar el funcionamiento de la instrumentación y construcción del mismo, utilizando un controlador difuso, técnica de control adecuada para el manejo de sistemas de cualquier tipo de complejidad. A partir de los resultados mostrados, se concluye que el prototipo generado representa una opción viable para la aplicación de algoritmos de control en un sistema dinámico de un helicóptero, fortaleciendo las competencias relacionadas con el área de control y sus aplicaciones a vehículos aéreos, mediante el desarrollo de prácticas y trabajos de investigación.

Referencias

- Bonifacio, M., & Sanz, A. (2006). *Redes Neuronales y Sistemas Borrosos*. Madrid: RA- MA.
- Brizuela-Mendoza, J., Rosales-Díaz, A., Rumbo-Morales, J., Sorcia-Vázquez, F., & Martínez-García, M. (2019). Diseño, instrumentación y control de un helicóptero de tres grados de libertad. *RIIT. Revista internacional de investigación e innovación tecnológica*, 7(37).
- Educación en ingeniería. (s.f.). myRIO-Dispositivos embebidos para estudiantes. Recuperado el 20 de noviembre de 2021 de <https://www.ni.com/es-mx/shop/hardware/products/myrio-student-embedded-device.html>
- Federal Aviation Administration. (2019). *Helicopter Flying Handbook*. Oklahoma. USA.
- Guerrero-Hernández, A., Araque-Gallardo, J. & Gallo-Nieves, M. (2016). “Implementación de módulos didácticos para sistemas electrónicos de potencia”. *Revista Educación en Ingeniería*, 11 (21), 9-13.
- Guevara, P., Falcón, J., Sandoval, R. & Medel J. (2009). “Equipos Didácticos Industriales en el modelo educativo de los Cecati”. *Innovación educativa*, 9(48), 73-81.
- Herrera, F., Merchan, S. & Villamizar, F. (2010). “Kit de desarrollo robótico: Una herramienta de aprendizaje en ingeniería”. *Revista Educación en Ingeniería*, 5(9), 49-63.
- Jiménez, A., Sanz, R., Matía, F., & Galán, R. (2000). Control Inteligente. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 43-48.
- Padfield, R. (2014). *Learning to fly helicopters*. Chicago: Mc Graw Hill Education.
- Parra, N. (2015). “Diseño y construcción de un helicóptero coaxial controlado sobre Android”. [Tesis de Ingeniería, Universidad politécnica de Madrid].
- Ponce, P. (2010). *Inteligencia Artificial con aplicaciones a la Ingeniería*. Ciudad de México: Alfaomega.
- Products and Lab Solutions. (s.f.). Solutions optimized for the academic environment. Recuperado el 20 de noviembre de 2021 de <https://www.quanser.com/products/>
- Solaque, L., Cristancho, C., & Gil, C. (2014). Diseño e implementación de una plataforma experimental de dos grados de libertad controlada por dos técnicas: PID y lógica difusa. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 24(1), 99-115.
- Tovar, G. & Figueroa, E. (2021). “El helicóptero como factor decisivo para la movilidad táctica: el caso colombiano (1997-2012)”. *Revista Científica General José María Córdova*, 19(34), 309-330. <http://dx.doi.org/10.21830/19006586.750>