

Diseño Y Validación De Un Sistema De Control De Nivel Con Montaje Electromecánico

Usando Acelerómetros Y Motores Brushless

Trabajo para optar al título de Ing. Electrónica e Ing. Eléctrica

Jorge Fernando Quintanilla Mantilla y María Del Pilar Garcés Castrillón

Director:

Mag. Jaime Guillermo Barrero Pérez

Codirector:

Mag. David Alberto Padilla Toloza

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela De Ingenierías Eléctrica, Electrónica Y De Telecomunicaciones

Bucaramanga

2022

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia porque sin su apoyo y esfuerzo, mis estudios no hubiesen sido posibles, gracias a mis padres por ser los principales promotores de mis sueños, a mi madre, Consuelo Castrillón, que sin su apoyo y cariño no sería la mujer soy ahora, a mi padre, Jesús Garcés, que con sus consejos y experiencias ha formado mi carácter, a ellos por su entendimiento y compañía que han sido como agua en el desierto, por desear y anhelar siempre lo mejor para mi vida. Agradezco también a mis hermanos, Jose Luis y Juan Carlos Garcés, por siempre traer felicidad y seguridad a mis días e inculcar en mí, esfuerzo y valentía.

Gracias a Indira Lorena Rodríguez por ser mi polo a tierra, por su apoyo a lo largo de mi vida, su amor incondicional, sus consejos y palabras de aliento que hicieron de mí una mejor persona y anhelo me siga acompañando en todos mis sueños y metas.

Gracias a mi amigo, y compañero de tesis, Jorge Quintanilla por permitirme ser partícipe del fin de nuestra vida estudiantil, el inicio de nuestra vida laboral, por luchar hombro a hombro en el desarrollo de este proyecto, y la vida nos traerá un futuro prometedor.

A mis compañeros de carrera, y amigos, Iván Blanco, Erika Zanguña, Astrid Duarte y Paula Mogollón por compartir su conocimiento, alegrías y tristezas que hicieron mis días de estudio los mejores que haya podido imaginar.

Gracias, con todo amor y cariño del mundo, a mi suegro Alirio Rodríguez Ordóñez, quien demostró que, con motivación e inspiración, se puede superar y amar cada día más.

María del Pilar Garcés Castrillón

Hoy Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a Dios y a mi Familia que pese a las dificultades que sobrelleve, estuvieron ahí presentes Siempre. En especial a Mamá, a Papá y a Gloria quienes son y serán siempre el motor de motivación de salir adelante.

También quiero expresar mis agradecimientos, a Juan José, Mari, Santiago, Brayan y demás compañeros con los que compartí esta travesía llamada Universidad Teniendo muy presente tantas experiencias, alegrías, frustraciones, celebraciones, derrotas, que, pese a todo con su apoyo, le dieron sentido a la Palabra Amistad.

Quiero agradecerle A la Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones E3T que por algunos años fue mi segundo hogar, escenario del saber al cual le debo mucho y que espero algún día recompensar.

Por último, quiero manifestar aprecio y gratitud a mi compañera de Trabajo de Grado, Pilar Garces, quien estuvo de forma incondicional con sus consejos y ánimos gran parte de mis estudios, una excelente amiga, que se atrevió a ser parte de este gran reto sin importar las adversidades, y siempre con la mirada en alto, buscando nuestros sueños y metas.

Jorge Fernando Quintanilla

Resumen

Título: Diseño Y Validación De Un Sistema De Control De Nivel Con Montaje Electromecánico Usando Acelerómetros Y Motores Brushless.

Autor(es): Jorge Fernando Quintanilla Mantilla y María del Pilar Garcés Castrillón

Palabras Clave: Control, Brushless, sistema, método.

En este trabajo investigativo se controló el ángulo de inclinación dado por una unidad inercial por medio de un algoritmo que se aplica a dos motores sin escobillas (Brushless) con el fin de variar su velocidad. El sistema de control cuenta con una planta constituida por dos partes importantes, una barra móvil de madera que soporta dos motores Brushless (actuadores), uno a cada extremo, un acelerómetro (sensor) asegurado entre ellos, y una barra fija metálica inercial; para lograr dicho control se optó por implementar un compensador PID digital, basado en el método LGR (Lugar Geométrico de las Raíces), el cual se sintoniza por medio del análisis de lazo abierto de la planta, junto a su respuesta temporal ante una entrada tipo escalón.

Mediante simulaciones en el software MATLAB/SIMULINK, se evaluó el desempeño del algoritmo con requerimientos de diseño, como tiempo de establecimiento y sobrepico, para distintos escenarios de lectura de los acelerómetros.

*Trabajo de Grado.

** Universidad Industrial de Santander. Ingenierías Eléctrica y Electrónica. Director: Mag. Jaime Guillermo Barrero Pérez. Codirector: Mag. David Alberto Padilla Toloza.

Abstract

Título: Design And Validation Of A Level Control System With Electromechanical Assembly Using Accelerometers And Brushless Motors.

Autor(es): Jorge Fernando Quintanilla Mantilla y María del Pilar Garcés Castrillón

Palabras Clave: Control, Brushless, system, method.

In this investigative work, the angle of inclination given by an inertial unit was controlled by means of an algorithm that is applied to two brushless motors (Brushless) in order to vary their speed. The control system has a plant made up of two important parts, a mobile wooden bar that supports two Brushless motors (actuators), one at each end, an accelerometer (sensor) secured between them, and a fixed inertial metal bar; To achieve this control, it was decided to implement a digital PID compensator, based on the LGR (Geometrical Place of the Roots) method, which is tuned by means of the open loop analysis of the plant, together with its temporary response to an input type step.

Through simulations in the MATLAB/SIMULINK software, the performance of the algorithm was evaluated with design requirements, such as settling time and overshoot, for different accelerometer reading scenarios.

*Trabajo de Grado.

** Universidad Industrial de Santander. Ingenierías Eléctrica y Electrónica. Director: Mag. Jaime Guillermo Barrero Pérez. Codirector: Mag. David Alberto Padilla Toloza.

Tabla de contenido

Agradecimientos

Resumen

Introducción.....	9
1. Marco teórico.....	10
1.1 Teoría de control.....	10
2. Instrumentación.....	13
2.1 Componentes.....	13
2.1.1 Motor Brushless.....	13
2.1.1.1 A2212/2200 kV.....	13
2.1.1.2 Hélices.....	14
2.1.2 Controlador Electrónico de Velocidad	15
2.1.2.1 ESC Readytosky.....	15
2.1.3 Fuente DC.....	16
2.1.3.1 ATX 12 Vd.....	16
2.1.4 Sensor.....	17
2.1.4.1 Acelerómetro.....	17
2.1.4.2 Giroscopio.....	18
2.1.4.3 MPU 6050.....	18
2.1.5 Tarjeta de desarrollo.....	19

2.1.5.1 ESP32.....	19
2.1.6 Simulink.....	21
2.2Esquemático del sistema.....	21
2.3Conexiones eléctricas de control y potencia.....	22
2.4Costos.....	24
3Marco metodológico.....	24
3.1Modelo de la planta.....	24
3.2Diseño del controlador.....	31
4Resultados.....	39
4.1Montaje.....	39
4.2Algoritmo de control.....	40
4.3Gráficas experimentales.....	41
5Conclusiones.....	47
5.1Trabajos futuros.....	47
5.2Repositorio.....	48
6Referencias.....	48
7ANEXOS.....	48

Lista de tablas

Tabla 1. Datos de especificación técnica del fabricante.....	14
Tabla 2. Características física Hélices.....	15
Tabla 3. Características técnicas del ESC.....	16
Tabla 4. Características técnicas de la Fuente.....	17
Tabla 5. Características técnicas del MPU.....	19
Tabla 6. Características técnicas del Microprocesador ESP32.....	20
Tabla 7. Tabla de costos	24

Lista de figuras

Fig. 1. Modelo representativo de la dinámica de una planta en continua.....	10
Fig. 2. Sistema de control continuo en lazo cerrado.....	10
Fig. 3. Sistema de control continuo en lazo cerrado con controlador discreto.....	11
Fig. 4. Equivalencia sistema de control discreto en lazo cerrado.....	12
Fig. 5. Motor Brushless A2212/6T 2200 kV.....	14
Fig. 6. Hélices 6040 para motor Brushless.....	15
Fig. 7. ESC (Electronic Speed Controller) 30 A.....	16
Fig. 8. Fuente de Tensión ATX 12 Vd	17
Fig. 9. MPU 6050 Gy 521.....	19
Fig. 10. ESP32 D1 R32.....	20
Fig. 11. Esquema del Balancín.....	22
Fig. 12. Conexiones de la Planta.....	23
Fig. 13. Modelo de caja negra.....	25
Fig. 14. Importación de datos de Motor 1 con cambio de variable.....	26
Fig. 15. Importación de datos de Motor 2 con cambio de variable.....	26
Fig. 16. System Identification Motor 1.....	27
Fig. 17. System Identification Motor 2.....	27

Fig. 18. Gráfica Entrada vs tiempo y Salida vs tiempo Motor 1.....	28
Fig. 19. Gráfica Entrada vs tiempo y Salida vs tiempo Motor 2.....	28
Fig. 20. Opción Transfer Function Motor 1.....	29
Fig. 21. Opción Transfer Function Motor 2.....	29
Fig. 22. Modelo Planta Motor 1.....	30
Fig. 23. Modelo Planta Motor 2.....	30
Fig. 24. LGR Motor 1.....	32
Fig. 25. Respuesta al escalón Motor 1.....	32
Fig. 26. Respuesta al escalón con controlador Motor 1.....	33
Fig. 27. Respuesta al escalón con controlador Motor 2.....	34
Fig. 28. Simulación en Lazo Cerrado con controlador y planta discreta, Motor 1.....	35
Fig. 29. Respuesta al escalón con controlador Motor 1.....	35
Fig. 30. Simulación en Lazo Cerrado con controlador y planta discreta, Motor 2.....	37
Fig. 31. Respuesta al escalón con controlador Motor 2.....	37
Fig. 32. Montaje electromecánico	39
Fig. 33. Montaje electromecánico con fuente de alimentación y mando de control.....	39
Fig. 34. Respuesta del sistema a Setpoint de 10° con ambos Motores.....	41
Fig. 35. Respuesta del sistema a Setpoint de -10° con ambos Motores.....	42
Fig. 36. Respuesta del sistema a Setpoint de 30° con ambos Motores.....	42

Fig. 37. Respuesta del sistema a Setpoint de -40° con ambos Motores.....	43
Fig. 38. Respuesta del sistema a Setpoint de 50° con ambos Motores.....	43
Fig. 39. Respuesta del sistema a Setpoint de -50° con ambos Motores.....	44
Fig. 40. Respuesta del sistema a Setpoint de 10° a -35° con ambos Motores.....	44
Fig. 41. Respuesta del sistema a Setpoint de -35° a 40° con ambos Motores.....	45
Fig. 42. Respuesta del sistema a Setpoint de -40° a -40° con ambos Motores.....	45
Fig. 43. Respuesta del sistema a Setpoint de -60° Motor 2.....	46
Fig. 44. Respuesta del sistema a Setpoint de 10° Motor 1.....	46

Introducción

En la actualidad existen campos de estudio e investigación que vinculan distintas áreas de conocimiento teórico-práctico. La teoría de control es un campo interdisciplinario, que relaciona las matemáticas, la física elemental, los fundamentos de programación y automatización, circuitos eléctricos, máquinas eléctricas, y teorías más elaboradas, con el fin de constituirse en una herramienta completa y para dar respuesta a un problema o situación que gira en torno a la supervisión de un proceso (planta), la cual requiere tener un modelo dinámico, con el fin de poder analizar y entender su comportamiento para aplicar un control y obtener el resultado deseado.

La teoría de máquinas eléctricas es un campo de estudio basado en el análisis cinemático, estático y dinámico con un desarrollo teórico-práctico en su diseño preliminar. En este trabajo investigativo se hace referencia a una parte metodológica relativa a los motores, los motores *Brushless* que son caracterizados por no emplear escobillas, o algún sistema de conmutación mecánica, por esta razón se requiere utilizar una tarjeta de control que permite la regulación, en sentido de giro y velocidad, para lograr su funcionamiento.

A modo de contextualizar el objeto de estudio, evidenciar el problema de investigación y proponer una estrategia ingenieril para su solución, este proyecto presenta las áreas de conocimiento como complemento a la premisa de ofrecer alternativas para una situación relativa a teoría de control y máquinas. A su vez, se relaciona el área de sensores de movimiento (acelerómetro), para detectar las fuerzas de aceleración en el espacio

tridimensional, ya sean estáticas o dinámicas (incluidas gravedad, vibraciones y movimiento), que pueden ser leídas, por medio de un microcontrolador, señales a los motores para modificar su funcionamiento variando su velocidad a partir de una lectura de nivel.

En aprovechamiento de este trabajo se propone aplicar la estructura al ámbito educativo de la escuela E3T, con su implementación en laboratorios, propiciando la ejecución de prácticas, tanto de forma experimental como de simulación, por medio de un modelo identificado previamente usando MATLAB/SIMULINK que permiten analizar parámetros propios, como potencia, velocidad de giro y torque de los motores, con el fin de obtener respuesta al ángulo de inclinación deseado y el desarrollo de algoritmos partiendo de la teoría de control clásica y moderna.

Como resultado de este proyecto se espera promover estudios y propuestas futuras en las áreas de conocimiento, como el mejoramiento del diseño en el sistema de control empleado, obtención de mejores modelos, extender el análisis de motores *brushless*; todo esto a partir de la aplicación en que sean empleados, desde *drivers* de discos en sistemas (HD) hasta desarrollos industriales como robótica, aviación, aeroespacial, instrumentación, equipos de automatización, entre otros.

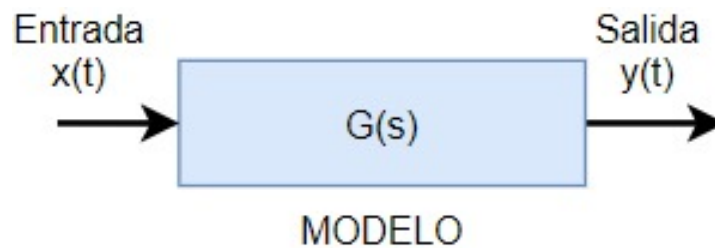
1. Marco Teórico

1.1 Teoría de control:

El objetivo principal a la hora de implementar un sistema de control es la estabilidad, por ello se busca mantener el mínimo error entre la referencia o entrada y la salida.

Figura 1.

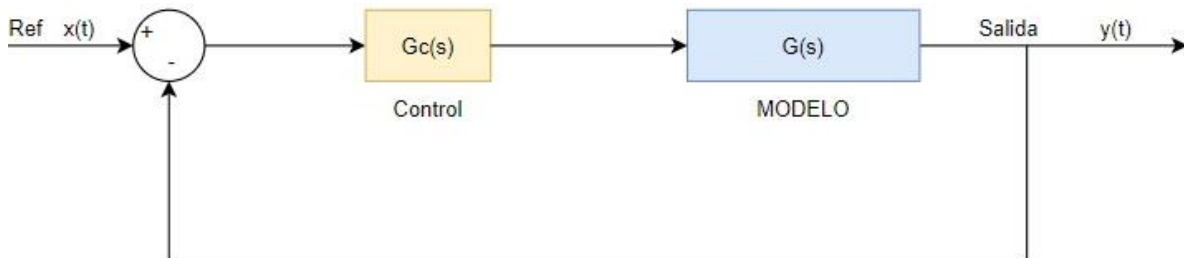
Modelo Representativo de la dinámica de una planta en continuo.



Partiendo de una planta de naturaleza continua, se conforma un sistema de control con topología de servocontrolador, con el cual se espera seguir una referencia, sin tener en cuenta las perturbaciones.

Figura 2.

Sistema de Control Continuo en Lazo cerrado.

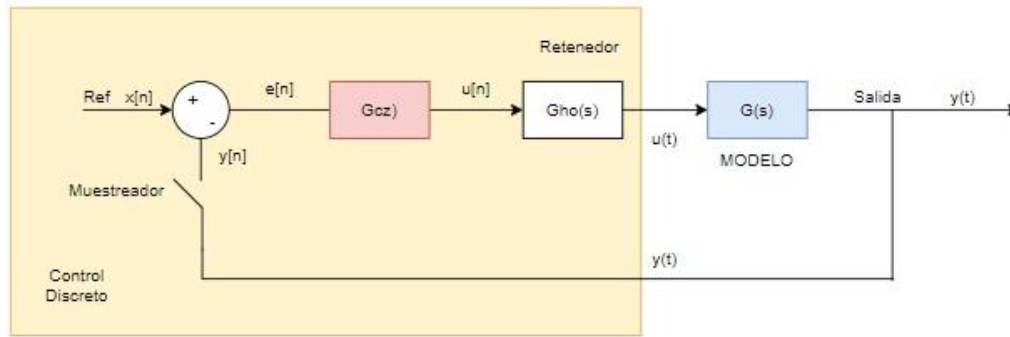


Para realizar el diseño del sistema de control digital, que envía señales de acción de control al modelo de la planta por medio de un microprocesador, se obtiene la equivalencia del compensador en dominio discreto, para esto se procede a discretizar únicamente el controlador adicionando un muestreador en la señal de error entrante al controlador, y un retenedor a la salida de este enviando señales a la planta. Como criterio para el uso del muestreador se debe tener un periodo de muestreo de $\tau/10$, lo cual indica que toma 10 muestras por cada τ , el proceso anterior se denomina Operador Asterisco y es una herramienta que permite realizar convoluciones entre señales continuas y discretas al mismo tiempo.

Con el fin de hallar el sistema de bloques discreto equivalente usando el concepto Asterisco, inicialmente se identifican los muestreadores del sistema y las señales que entran al controlador, es decir, la señal de error $e(s)$.

Figura 3.

Sistema de Control Continuo en Lazo cerrado, con Controlador Discreto.



Teniendo en cuenta la señal que pasa antes del muestreador se tiene que:

$$E(s) = R(s) - G(s)Gho(s)Gc^*(s)E^*(s)$$

Teniendo la ecuación de salida Y(s):

$$Y(s) = G(s)Gho(s)Gc^*(s)E^*(s)$$

Aplicando Operación Asterisco a ambos lados de las ecuaciones $E(s)$, $Y(s)$ y realizando despeje de $E^*(s)$ se tiene:

$$E^*(s) = \frac{R^*(s)}{1 + GGho^*(s)Gc^*(s)}$$

$$Y^*(s) = GGho^*(s)Gc^*(s)E^*(s)$$

Reemplazando $E^*(s)$ en $Y^*(s)$ se tiene

$$Y^*(s) = \frac{GGho^*(s)Gc^*(s)R^*(s)}{1 + GGho^*(s)Gc^*(s)}$$

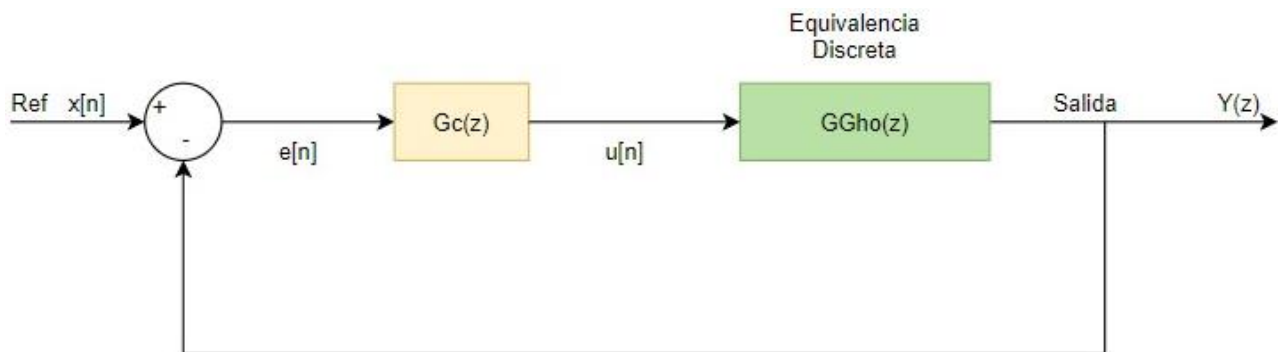
Pasando todo al dominio discreto y despejando Y/R se tiene:

$$\frac{Y(z)}{R(z)} = \frac{GGho(z)Gc(z)}{1 + GGho(z)Gc(z)}$$

Siendo la función de transferencia $C(z) = \frac{Y(z)}{R(z)}$, la representación del modelo discreto para el controlador digital es el siguiente:

Figura 4.

Equivalencia Sistema de Control Discreto en Lazo cerrado.



Posteriormente se procede a la obtención y el análisis del compensador compuesto PID

$$PID(z) = P(z) + I(z) + D(z)$$

Donde la parte proporcional (P) se encarga de disminuir el error en estado estable, a su vez, tiende a aumentar la rapidez en la respuesta transitoria y el sobrepico. $P(z) = kp$.

La parte integral (I) aumenta el tipo del sistema eliminando el error de posición, tiende a ralentizar el sistema. $I(z) = ki * \frac{z}{z-1}$.

La parte derivativa (D) disminuye las oscilaciones y tiende a hacer el sistema más rápido.

$$D(z) = kd * \frac{z-1}{z}$$

$$PID(z) = kp + ki * \frac{z}{z-1} + kd * \frac{z-1}{z}$$

$$PID(z) = \frac{z^2 (kp + ki + kd) - z (kp + 2kd) + (kd)}{(z^2 - z)}$$

Se implementan los compensadores digitales en microcontroladores en forma de ecuaciones recursivas tomando la función de transferencia y multiplicando arriba y abajo por z^{-n} , donde n es el grado de la función de transferencia:

$$PID(z) = \frac{(z^{-2}) [z^2 (kp + ki + kd) - z (kp + 2kd) + (kd)]}{(z^2 - z)(z^{-2})}$$

$$PID(z) = \frac{(kp + ki + kd) - z^{-1} (kp + 2kd) + z^2 (kd)}{(1 - z^{-1})}$$

Definiendo el controlador como $Gc(z) = \frac{U(z)}{E(z)}$

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{(kp + ki + kd) - z^{-1} (kp + 2kd) + z^2 (kd)}{(1 - z^{-1})}$$

$$U(z) - z^{-1}U(z) = E(z)(kp + ki + kd) - E(z)z^{-1}(kp + 2kd) + E(z)z^{-2}(kd)$$

Se realiza la conversión de variables del dominio de frecuencia (z) al tiempo $[n]$ se despeja $U[n]$ teniendo así, la ecuación recursiva:

$$U[n] = e[n](kp + ki + kd) - e[n-1](kp + 2kd) + e[n-2](kd) + u[n-1]$$

2. Instrumentación.

Para el diseño del sistema se tiene presente lo siguiente: consiste en tres partes fundamentales que son: base, eje y barra “pívot”. Con miras de darle un buen soporte y estabilidad, al sistema en general, se elige utilizar una tabla de madera cedro como base, donde se fijan dos ESC y el microcontrolador (ESP32); un eje vertical de material metálico al cual se incorpora una barra de madera liviana horizontal mediante un sistema de rodamientos (Chumacera) para minimizar la fuerza de fricción~rozamiento, esta barra móvil o balancín soporta un acelerómetro en el medio y dos propulsores (hélice-motor), uno a cada extremo, que proveen fuerza suficiente al sistema permitiendo su oscilación a una referencia deseada.

El diseño y construcción de la planta sirve como base para estudios de modelado y control automático en ingeniería. A continuación, se detalla su funcionamiento y la elección de cada componente utilizado para la realización del diseño del proyecto.

2.1 Componentes

2.1.1 Motor Brushless

Los motores sin escobillas de corriente directa son motores que, como su nombre lo indica, no hacen uso de colectores para la energización de las bobinas en su interior, en lugar de esto, realizan la conmutación de manera electrónica, esto conlleva evitar desgastes o pérdidas significativas por rozamientos, disminución de calor y realizar mantenimientos continuos,

por tanto, los hace más ventajosos respecto a peso y relación velocidad vs torque, alta respuesta dinámica y eficiencia, mayor rango de velocidad, mayor vida útil y alto uso en aplicaciones industriales como automóviles eléctricos, helicópteros, drones de aeromodelismo; debido a que la relación torque vs tamaño del motor es mayor a la de los motores DC convencionales, les da mayor utilidad en aplicaciones en donde el espacio y peso son factores críticos. A su vez, estos motores, al no energizar las bobinas por medio de escobillas sino de manera electrónica, son más robustos ya que para controlar su velocidad de giro se utiliza un ESC (Controlador electrónico de velocidad) para variar las velocidades de giro por medio de PWM (Modulación por ancho de pulsos) ya sea por microcontrolador o por transmisor de control remoto.

2.1.1.1. A2212/2200 kV

El motor seleccionado fue A2212/2200 kV 6T que soporta hasta 12A, es ideal para sistemas de tipo aeromodelismo, así como para vehículos aéreos de ala fija.

Figura 5.

Motor Brushless A2212/6T 2200K



Fuente: <https://www.mdronecolombia.com/wp-content/uploads/2018/08/221222004-835x624.jpg>

Tabla 1.

Datos de especificación técnica del fabricante

Eficiencia máxima	80 %
Eficiencia de corriente máxima	> 75 % (4 - 10 A)
Corriente	12 A / 60 s
Sin carga	10 V, 0.5 A
Corriente máxima	28 A / 60 s
Diámetro del eje	3.17 mm
Longitud del eje	12 mm
Propelas adecuadas	6"
Batería ideal	Li-Po 2 a 3 celdas. 11 V, 6 Ah
Kv	2200 rpm/V
Resistencia	0.033 ohm
Peso	52 g
Potencia máxima	342 W
Dimensiones	27.5 x 30 mm

2.1.1.2. Hélices

De acuerdo con las especificaciones del motor elegido, se encuentra que dentro de las referencias de hélices recomendadas está la de 6", por tanto, se escogieron propelas 6040, donde 60 indica la distancia de largo en pulgadas (6.0" ~ 153 mm) y 40 la distancia de paso (4.0" ~ 102 mm) de la hélice.

Figura 6.

Hélices 6040 para motor Brushless



Fuente: <https://www.mdronecolombia.com/wp-content/uploads/2018/08/kit60405.jpg>

Tabla 2.

Características físicas Hélice.

Tamaño	6040
Peso	4.1 g
Material	Nylon
Color	Gris

2.1.2 Controlador Electrónico de Velocidad

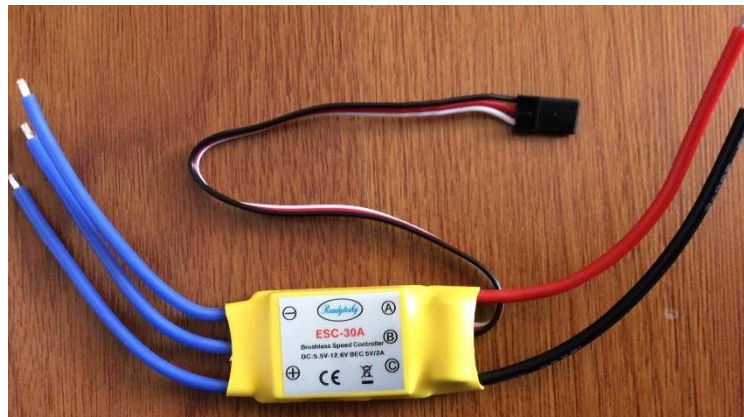
Los ESC's (por sus siglas Electronic Speed Controller) son los controladores de velocidad electrónicos encargados de variar la velocidad (RPM) del motor *brushless* intercambiando conexiones o polaridades de embobinados por medio del ancho de pulsos, o PWM, compatibles con este tipo de motores. A partir de un receptor son enviados datos en función de la posición angular, que viajan hacia el ESC donde de manera electrónica se produce la traducción de datos a pulsos internamente, siendo esta modulación de ancho de pulso PWM comúnmente de frecuencia de 50Hz, demandando de la batería la energía necesaria para proveer de señal trifásica AC al rotor del motor *brushless* generando así una respuesta. La elección de baterías para alimentación en la etapa de potencia es importante ya que están altamente relacionadas con la selección del ESC, el cual depende igualmente de la configuración de motores empleados.

2.1.2.1. ESC Readytosky

Para realizar el cambio de giro y variación de velocidad, el motor requiere de un controlador electrónico de velocidad externo; teniendo en cuenta la especificación de corriente máxima permitida por éste (28A) se optó por un controlador ESC, recomendado para este tipo, de 30A.

Figura 7.

(ESC Electronic Speed Controller) 30A



Fuente: <https://www.mdronecolombia.com/wp-content/uploads/2018/08/esc30ampreadytosky1.jpg>

Tabla 3.

Características Técnicas del ESC.

Corriente continua	30A
Corriente de ráfaga	40A (10 s)
Voltaje de entrada	11 Vd ~ 12 Vd.
Tamaño	32 x 24 x 7 mm
Peso	25 g
Bec (Regulador externo de alimentación)	Si (5V / 3A)
Tecnología (Soporte lógico)	Simonk

2.1.3 Fuente DC

La fuente de poder o de alimentación (PSU – *Power Supply Unity*) es el dispositivo que se encarga de transformar la corriente alterna de la línea eléctrica (~120 volts) en corriente

continua o directa; que es la que utilizan los dispositivos electrónicos tales como televisores y computadoras. Estos dispositivos suelen manejar varios niveles de tensión y de corriente, típicamente de 12V, 5V y 3.3V.

2.1.3.1 ATX 12Vd

Para la alimentación de los motores, se optó por una tensión de 12 [V] y corriente de 15 [A].

Figura 8.

Fuente de Tensión ATX 12Vd



Fuente:

<http://1.bp.blogspot.com/>

[ms2jZlmh1bQ/UHH7XIsrf5I/AAAAAAAAATc/DYbZfDdlws/s1600/C1.jpg](http://1.bp.blogspot.com/ms2jZlmh1bQ/UHH7XIsrf5I/AAAAAAAAATc/DYbZfDdlws/s1600/C1.jpg)

Tabla 4.

Características Técnicas de la Fuente.

Power Supply 500w Switching Power						
Tipo de Fuente	ATX12V					
Valores de entrada AC	115/230 VAC ~ 6/3 A ~ 50/60Hz					
Valores de salida DC~Tensión MAX	+12V	+5V	+3.3V	+5VSB	-12V	-5V
Valores de salida DC~Corriente MAX	15A	25A	20A	2A	0.5A	0.5A

2.1.4 Sensor

2.1.4.1. Acelerómetro

El acelerómetro es un sensor que permite medir la aceleración a la que es sometida una masa.

El funcionamiento del dispositivo consta de un cuerpo sólido en donde internamente se suspende una masa sujeta por muelles al cuerpo exterior.

Al existir aceleración sobre el sensor se ejerce una fuerza sobre la parte móvil, o muelles, creando así un desplazamiento en los mismos; y la distancia a la que se encuentren de la parte fija puede ser medida para determinar la magnitud de la aceleración.

Estos acelerómetros normalmente son de 3 ejes, pueden detectar movimiento en el sensor en los ejes X, Y y Z simultáneamente, es decir, no sólo detectan la magnitud sino a su vez la dirección de la aceleración medida.

Este sensor se ve afectado por la aceleración de la gravedad terrestre permitiendo detectar condiciones de caída libre y dicha medición de gravedad puede ser empleada para determinar la orientación del sensor, es decir, su posición angular, por medio de ecuaciones trigonométricas.

2.1.4.2 Giroscopio

El giroscopio es un dispositivo que al provocar rotación por un determinado mecanismo permite medir el ángulo de aquella variedad rotacional, éstos, a diferencia de los acelerómetros, no poseen una referencia absoluta, sino que siempre miden los ángulos relativos a una referencia arbitraria. Existen diversos tipos como mecánicos, de anillo láser, de fibra óptica. El funcionamiento del giroscopio vibratorio de efecto Coriolis, comúnmente utilizado, consiste en un objeto vibratorio que sin importar su rotación tiende a vibrar en el mismo plano; el efecto mencionado, a partir de la fuerza ejercida por el objeto vibratorio, mide la rotación a la que está sometido. En el principio básico de este instrumento, que tiene similitudes con el acelerómetro, el cuerpo se ve sometido a vibración por resonancia y el efecto de esta fuerza deforma la estructura interna.

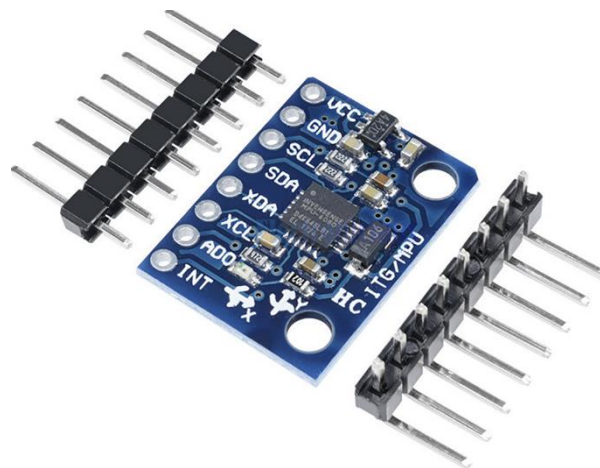
Al igual que el acelerómetro, el giroscopio registra de manera independiente en los planos X, Y y Z simultáneamente lo que permite detectar la magnitud y la dirección de la rotación.

2.1.4.3 MPU 6050

Para la medición del ángulo del sistema, se utilizó el módulo MPU 6050 Gy 521 que consta de la combinación de acelerómetro y giroscopio, ambos con tecnología MEMS y 6 ejes de libertad (3 ejes acelerómetro y 3 de giroscopio); por tanto, cuenta con un gran nivel de precisión debido al *hardware* de conversión análogo-digital de 16 bits por cada canal, que permite la lectura de los ejes en tres dimensiones, X, Y y Z simultáneamente.

Figura 9.

MPU 6050 Gy 521



Fuente: <https://www.circuitarte.com/wp-content/uploads/2020/02/Giroscopio-Acelerometro-Mpu6050-Arduino-1.png>

Tabla 5.

Características Técnicas del MPU.

Voltaje de operación	3V ~ 5V
Grados de libertad	6 (3 acelerómetro, 3 giroscopio)

Rango acelerómetro (medida ajustable)	$\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g, \pm 16g$
Sensibilidad giroscopio	131 LSBs/dps
Rango acelerómetro (medida ajustable)	$\pm 250dps, \pm 500dps, \pm 1000dps, \pm 2000dps$
Interfaz (Protocolo de comunicación)	I2C

2.1.5 Tarjeta de desarrollo

Es una placa que contiene un microcontrolador principal que corre o ejecuta una serie de instrucciones de un programa suministrado, alrededor de este procesador o unidad principal se ha creado un diseño electrónico que permite la programación del componente, suministra el voltaje adecuado para el correcto funcionamiento del controlador y proporciona acceso a los periféricos de entrada y salida con el fin de realizar conexiones de sensores y actuadores.

2.1.5.1 ESP32

Estos microcontroladores son circuitos integrados que graban instrucciones y son escritas en un lenguaje de programación a utilizar en el entorno Arduino IDE; plataforma de código abierto cuyo objetivo principal se basa en hardware y software libre, flexible, fácil de utilizar con el fin de proporcionar el acceso y uso de la electrónica y programación para investigadores, creadores, desarrolladores y aficionados de la electrónica en general; y a su vez puede ser utilizado en otros programas como Simulink de Matlab. La ESP32 permite tomar información del entorno a través de sus pines de entrada de toda una gama de sensores y puede interactuar con aquello que le rodea controlando luces, motores y otros actuadores. De igual manera esta placa permite la tecnología IoT, WiFi y Bluetooth, y es aplicable para distintas necesidades de uso remoto.

Para realizar la lectura de datos y envío de señales de control al sistema, este microcontrolador, consta de 12 canales ADC con resolución de 12 bits y 2 canales DAC con resolución de 16 bits; además cuenta con protocolo I2C, SCL (System Clock) la línea de pulsos de reloj que sincronizan la comunicación en un sistema, y SDA (System Data) y siendo la línea donde se transmite la información binaria.

Figura 10.

ESP32 D1 R32



Fuente:

<https://dynamoelectronics.com/wp-content/uploads/2019/11/pinOut-R32-compressor.png>

Tabla 6.

Características Técnicas del Microprocesador ESP32.

CPU	Microprocesador de 32 bit Xtensa LX6 con doble núcleo
Memoria	520 KiB SRAM
Conectividad Inalámbrica	WiFi y Bluetooth
Bluetooth	v4.2 BR/EDR y BLE
WiFi	802.11 b/g/n
Interfaz (Protocolo de comunicación)	GPIO, DAC, ADC I2C, I2S, SPI
GPIO	10 x sensores de tacto
DAC	2 canales 8 x 2 bits
ADC	12 bit de hasta 18 canales
I2C	2 x interfaces
I2S	2 x interfaces
SPI	4

2.1.6 Simulink

Simulink es una herramienta incorporada de Matlab que, en lugar de usar lenguajes complejos de programación, hace uso de lenguaje visual en donde las funciones están representadas por bloques, lo que hace más sencilla su utilización, este lenguaje empleado es más abstracto que el de Matlab, al ejecutar un modelo en Simulink se genera un código en C que el ordenador reconoce y ejecuta. Este instrumento construye y simula modelos de

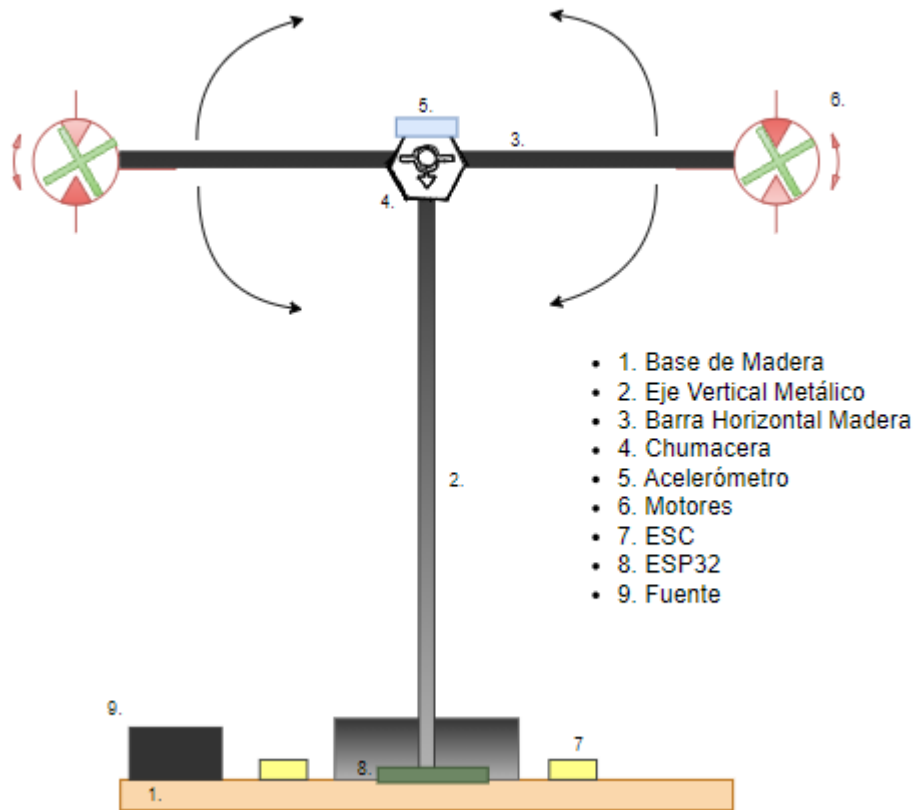
sistemas físicos y de control mediante diagramas de bloques. El comportamiento de dichos sistemas se define a partir de funciones de transferencia, operaciones matemáticas, elementos de Matlab y señales predefinidas de todo tipo. Debido a la conexión directa que tiene este software se pueden importar resultados obtenidos en Simulink para análisis más exhaustivos y obtener nuevos resultados. También algunos bloques nos dan la posibilidad de incorporar algoritmos propios de Matlab.

2.2 Esquemático del sistema

Se fijan los motores (*Fig 11*) en cada extremo de la barra horizontal con tornillos, y estos se conectan a las ESC con cables AWG (American Wire Gauge) #14 lo cuales son desmontables puesto que poseen conectores Hembra-Macho a fin de facilitar intercambio en fases, reparación, manipulación continua, etc. La ESC de cada motor se conecta por medio de dos cables jumper a la ESP32, que está fijo en la base, donde se envían la señal PWM y la referencia de tierra. El acelerómetro se coloca justo en medio de la barra horizontal con tornillos para tener una referencia al medir el ángulo en dos cuadrantes, este sensor se conecta al microprocesador por medio de 4 hilos de cable UTP, en los cuales se alimenta (5V) y se hace la transmisión de datos (SCL y SDA).

Figura 11.

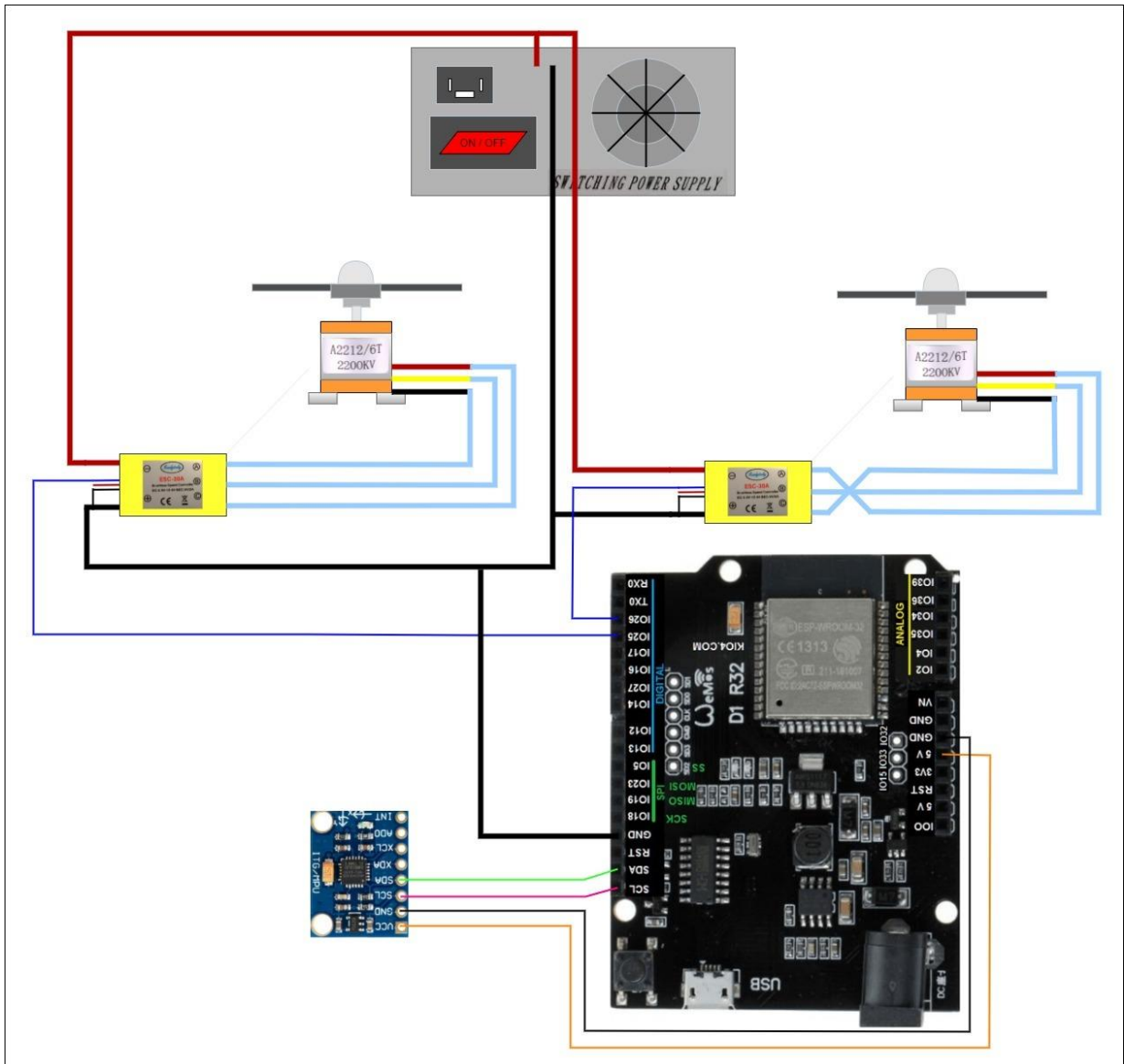
Esquema del Balancín.



2.3 Conexiones eléctricas de control y potencia.

Figura 12.

Conexiones de la Planta.



Nota: Línea verde representa SDA, línea rosa SCL. Negra y naranja, GND y 5 [V] respectivamente. Líneas roja y negra, de la fuente, representan 12 [V] y GND. Azul oscuro, de la ESC, representa señal PWM, y líneas celestes, fases de los motores.

El conexionado de la planta lo componen dos partes fundamentales, control y potencia, donde el sistema de control parte de la ESP32 al acelerómetro MPU6050 con el protocolo I2C (SDA, SCL), además genera la señal PWM al ESC por medio un periféricos PWM a cada

motor (IO25, IO26); y el de potencia está compuesto por una fuente que alimenta dos ESC, de las cuales derivan tres fases a cada motor para el sentido de giro, invirtiendo dos extremos en un motor para así dirigir de manera ascendente la balanza.

2.4 Costos

Para la realización de este proyecto se tuvieron los siguientes costos:

Tabla 7.

Tabla de costos

Ítem	Cantidad	Valor unitario	Total
Motores Brushless	2	\$29.000	\$58.000
ESC (Electronic Speed Controller)	2	\$28.000	\$56.000
MPU 6050 Y	1	\$8.000	\$8.000
Cable Vehicular AWG #14	5mts	\$1000	\$5.000
Conectores Hembra Macho	24	\$500 (Par)	\$6.000
Cable UTP	1mts	\$2.000	\$2.000
Chumacera y eje de Nylon	1	\$23.000	\$23.000

Otros varios, barra metálica, madera y tabla de base, etc	N.A	\$20.000	\$20.000
Fuente de Tensión	1	\$80.000	\$80.000
Micro ESP32	1	\$49.000	\$49.000
Totales			\$307.000 COP

3. Marco Metodológico

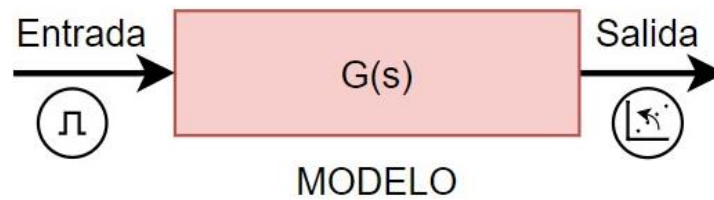
3.1 Modelo de la Planta:

Para la identificación y caracterización de la planta se tuvo en consideración un sistema con dos entradas y una salida, es decir un sistema MISO (Multiple Input Single Output), para lo cual se identificaron dos modelos, uno por cada motor al extremo.

El control de ángulo de inclinación se establece como un sistema de control en lazo abierto, que tiene como **entrada** una tensión unipolar (PWM) que es recibida en los motores y como respuesta se presenta una velocidad (RPM) lo cual hace que se incline la barra en alguna posición angular siendo esta la **salida**.

Figura 13.

Modelo de caja negra



Para la lectura de datos de entrada y salida se utilizó el microprocesador ESP32, el cual se programó por medio de la plataforma Arduino IDE (Ver Anexo 1), donde se genera la señal PWM, y a su vez se realiza el cálculo del ángulo de posición, Lo anterior sometido a un periodo de muestreo conforme al comportamiento de la planta, en este caso de 10 ms, con lo cual se establece lo siguiente:

Se optó por realizar un desplazamiento completo de la estructura (barrido de posición angular de valores positivos a negativos y viceversa) con el fin de tener una buena identificación en el modelo.

Teniendo en cuenta que la ESC del motor Brushless tiene un ciclo de trabajo de encendido en ancho de pulso de 1 [ms] hasta 2 [ms], y dada por la ESP32 se maneja una resolución de “12 bits~4095 valores” a una frecuencia de 60 [Hz], se establecen los valores HIGH~alto y LOW~bajo de la señal PWM realizando la siguiente conversión: $1/60[\text{Hz}] = 16.66$ [ms], y 16.66 [ms] \rightarrow 4095, por tanto, 1 [ms] \rightarrow 252, de modo que para hacer el desplazamiento de un extremo a otro fue suficiente tener 1.050 [ms] \rightarrow 260, siendo así, el ciclo de trabajo utilizado, el 3.3% del ciclo total.

El Motor 1 (derecha) partió de un ángulo inicial aproximado de -60° y llegó a un ángulo final aproximado de 60° ; mientras el motor 2 (izquierda) partió de 60° y llegó a un ángulo final de -60° .

Luego de contar con los datos y realizar ajustes en ellos; asegurando que tanto salida como entrada inicien en un mismo punto común “Origen”, es decir realizar un cambio de variable con el fin de encontrar un modelo lineal y a la vez cercano a la realidad, se procede a modelar con el método de caja negra, utilizando el software **MATLAB** con su **toolbox System Identification**.

Figura 14.

Importación de Datos del Motor 1 con cambio de variable

	A	B	C	D	E	F	G	H
	datos1							
	Number	Number	Number	Number	Number	Number	Number	Number
1	10	-61.52	252	10	252	61.68	0	0.16
2	10	-61.54	260	10			8	0.14
3	10	-61.56	260	10			8	0.12
4	10	-61.56	260	10			8	0.12
5	10	-61.54	260	10			8	0.14
6	10	-61.55	260	10			8	0.13
7	10	-61.56	260	10			8	0.12
8	10	-61.57	260	10			8	0.11
9	10	-61.59	260	10			8	0.09
10	10	-61.58	260	10			8	0.1
11	10	-61.57	260	10			8	0.11
12	10	-61.56	260	10			8	0.12
13	10	-61.56	260	10			8	0.12
14	10	-61.55	260	10			8	0.13
15	10	-61.49	260	10			8	0.19
16	10	-61.42	260	10			8	0.26
17	10	-61.52	260	10			8	0.16
18	10	-61.58	260	10			8	0.1
19	10	-61.5	260	10			8	0.18
20	10	-61.6	260	10			8	0.08
21	10	-61.57	260	10			8	0.11
22	10	-61.54	260	10			8	0.14
23	10	-61.68	260	10			8	0
24	10	-61.66	260	10			8	0.02

Figura 15.

Importación de Datos del Motor 2 con cambio de variable

	A	B	C	D	E	F	G	H
	datos1							
	Number	Number	Number	Number	Number	Number	Number	Number
1	10	63.47	252	10	252	63.54	0	-0.07
2	10	63.51	260	10			8	-0.03
3	10	63.52	260	10			8	-0.02
4	10	63.52	260	10			8	-0.02
5	10	63.53	260	10			8	-0.01
6	10	63.52	260	10			8	-0.02
7	10	63.5	260	10			8	-0.04
8	10	63.51	260	10			8	-0.03
9	10	63.54	260	10			8	0
10	10	63.54	260	10			8	0
11	10	63.53	260	10			8	-0.01
12	10	63.44	260	10			8	-0.1
13	10	63.4	260	10			8	-0.14
14	10	63.38	260	10			8	-0.16
15	10	63.44	260	10			8	-0.1
16	10	63.46	260	10			8	-0.08
17	10	63.36	260	10			8	-0.18
18	10	63.44	260	10			8	-0.1
19	10	63.48	260	10			8	-0.06
20	10	63.39	260	10			8	-0.15
21	10	63.37	260	10			8	-0.17
22	10	63.49	260	10			8	-0.05
23	10	63.48	260	10			8	-0.06
24	10	63.61	260	10			8	0.07

En la **toolbox System Identification** se importan los datos de entrada y salida con su respectivo valor inicial. y periodo de muestreo.

Figura 16.

System identification Motor 1

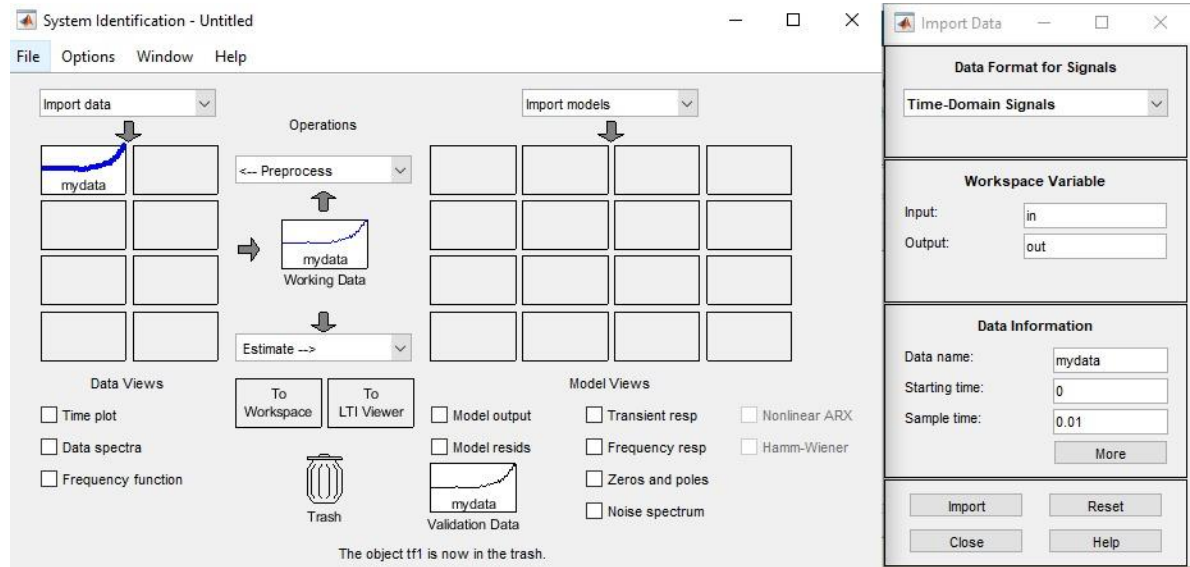
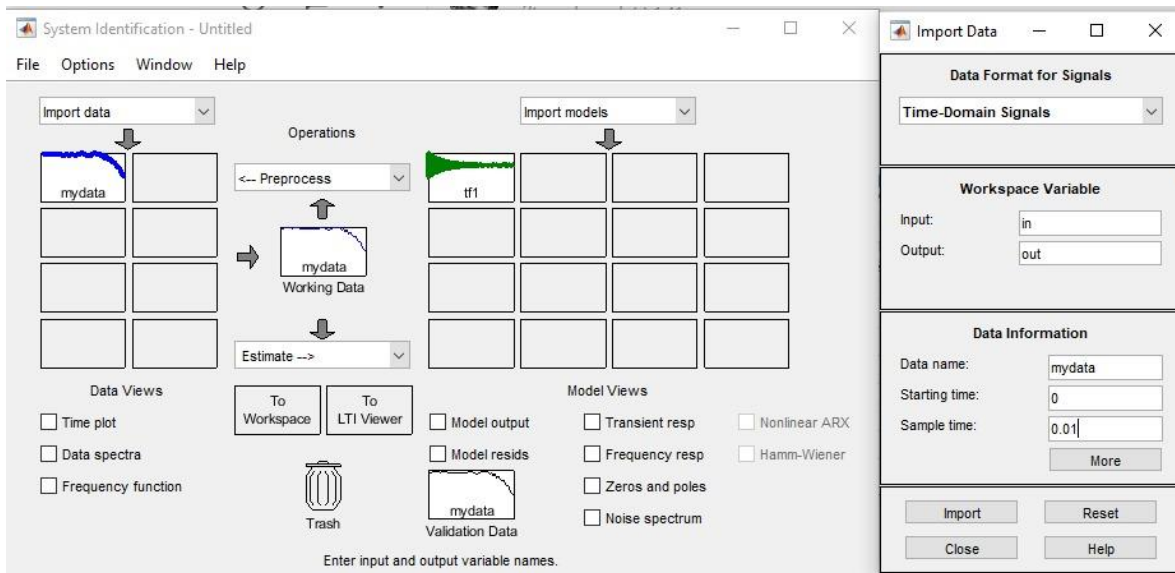


Figura 17.

System identification Motor 2



Para realizar la caracterización del modelo, se analizó el comportamiento de la salida con relación a la entrada en un determinado lapso con lo cual se observa que presenta un

comportamiento muy similar a uno de segundo orden (Sub-amortiguado), con un pequeño retraso aproximado de 0.3 [seg].

Figura 18.

Gráficas Entrada vs tiempo y Salida vs tiempo Motor 1

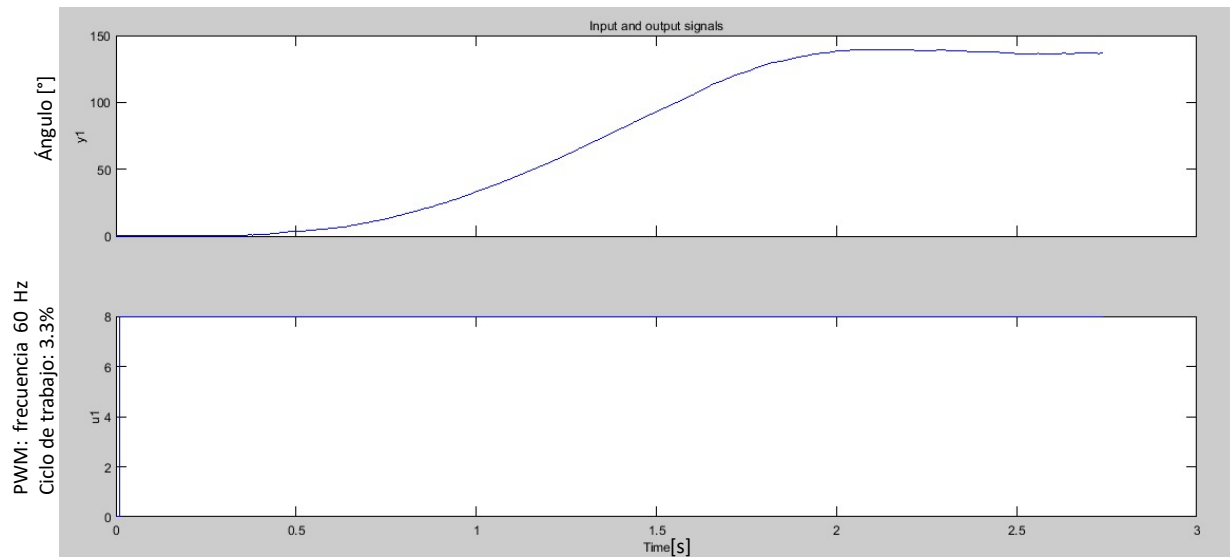
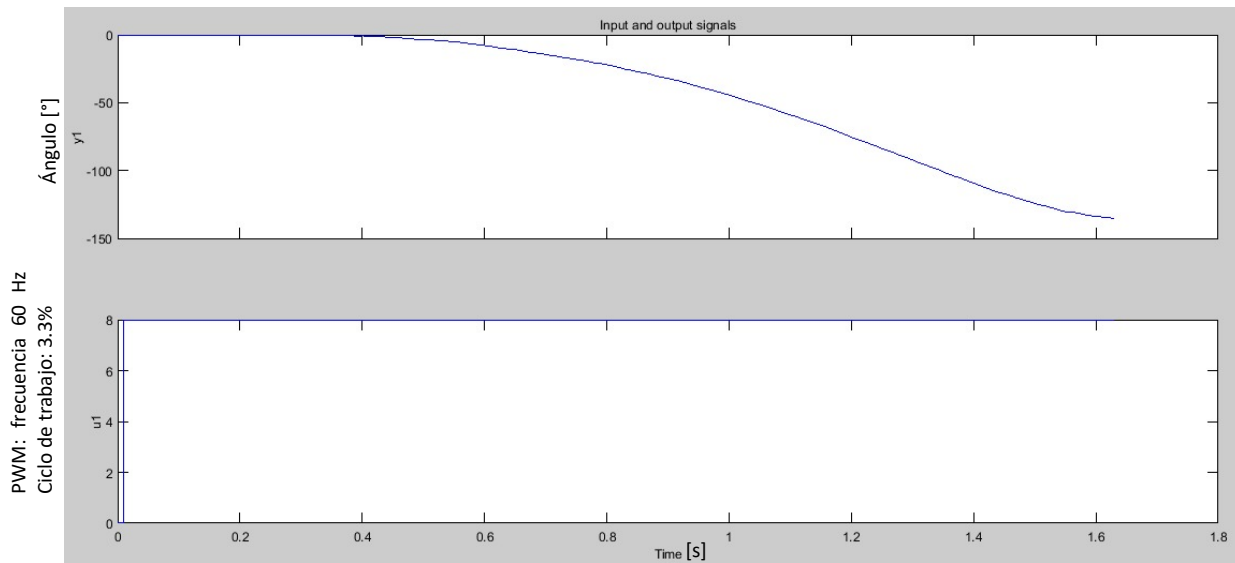


Figura 19.

Gráficas Entrada vs tiempo y Salida vs tiempo Motor 2



La opción **Transfer Fcn**, permite establecer el número de polos y ceros, que se quieren y a su vez el retardo que presenta el sistema, también se puede escoger el dominio en el cual se encuentran los datos inicialmente, como sabemos que la planta es de naturaleza continua se opta por establecer este modelo en continuo, todo esto con el fin de tener una base con la cual pueda realizar las iteraciones necesarias para llegar a lo esperado.

Figura 20.

Opción Transfer Function Motor 1

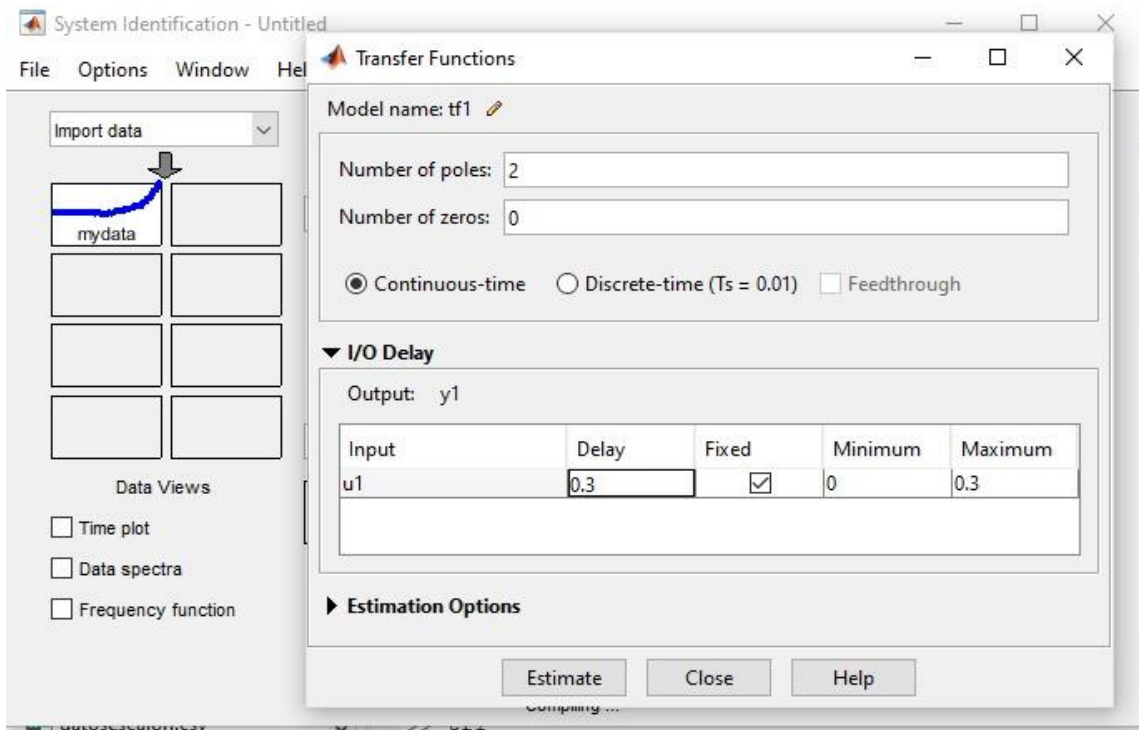


Figura 21.

Opción Transfer Function Motor 2

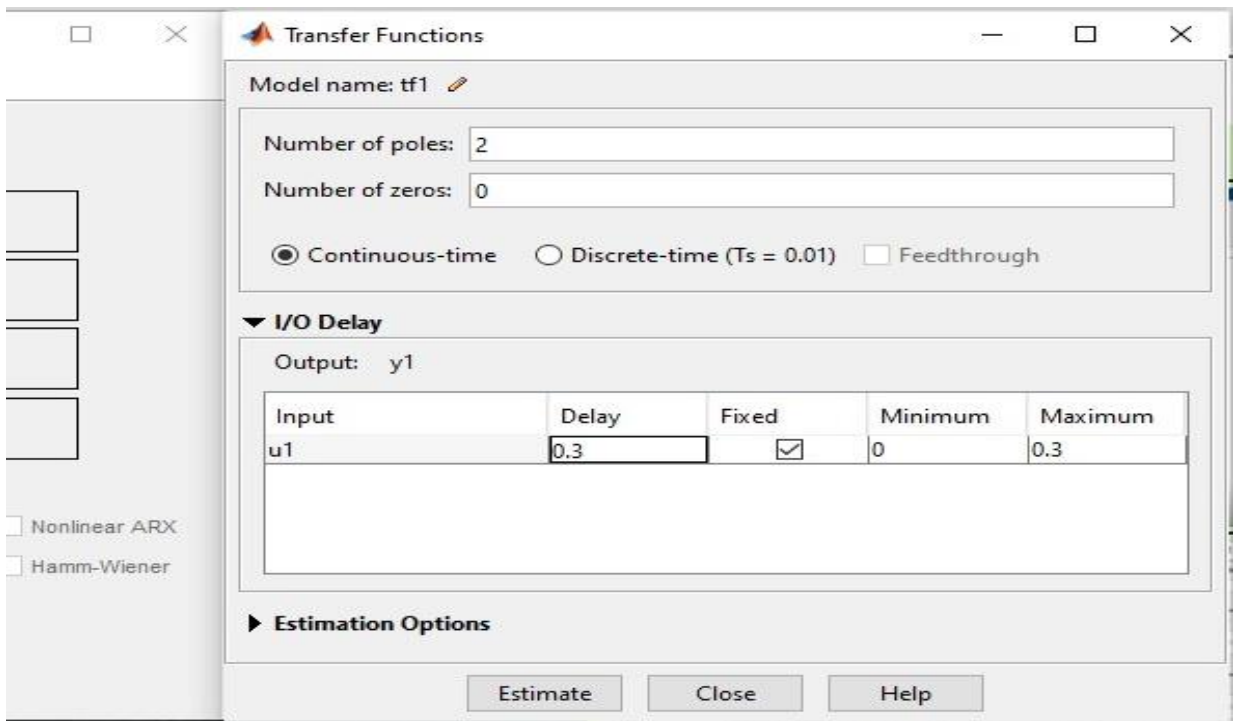


Figura 22.

Modelo Planta, Motor 1

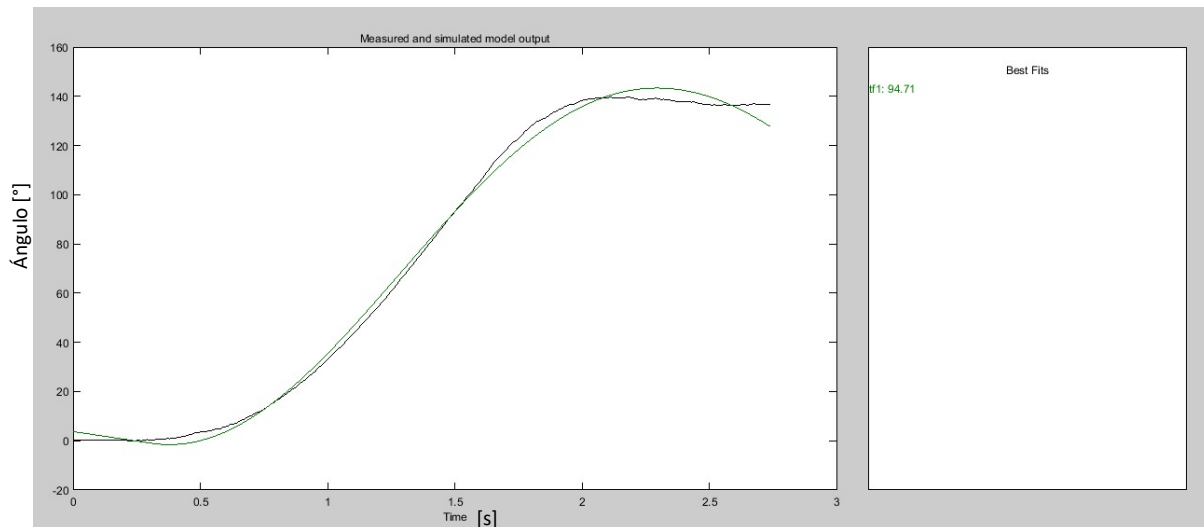
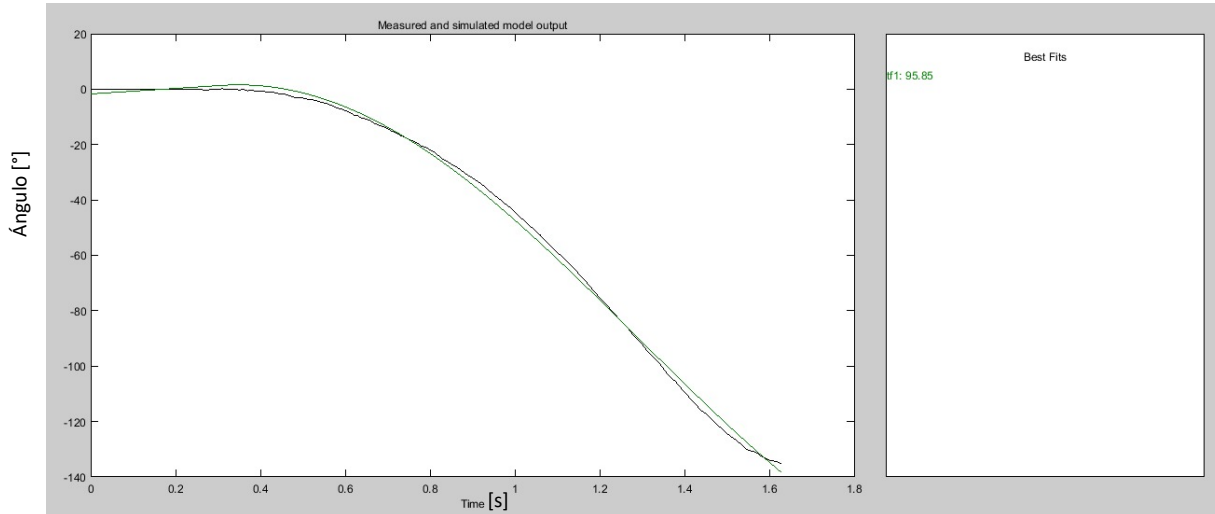


Figura 23.

Modelo Planta, Motor 2



Con lo cual se obtuvo la siguiente Función de transferencia Motor1:

$$\exp(-0.3*s) * \frac{26.94}{s^2 + 0.2572 s + 2.701}$$

Y a su vez la Función de transferencia Motor2:

$$\exp(-0.3*s) * \frac{-31.25}{s^2 + 0.000119 s + 2.801}$$

3.2 Diseño de Controlador:

Para el diseño del control discreto se partió del modelado de las plantas en continua, a las cuales se les aplicó el método de discretización del retenedor de orden cero, considerando un periodo de muestreo adecuado para cada planta, las cuales se evidencia que el barrido de ángulos transcurre en un tiempo de cinco (5) segundos, por tanto, para el tiempo estimado de

establecimiento $ts_{2\%}$ se tomaron cinco (5) segundos, siendo T_s (periodo de muestreo) el siguiente:

$$T_s = \frac{\frac{ts_{2\%}}{4}}{10} = 0.125[s]$$

Al aplicar el periodo de muestreo de control junto al método del retenedor (en MATLAB “c2d”) se obtuvo, en discreto, las respectivas plantas 1 y 2:

$$G_{p1Gho} = z^{-3} * \frac{(0.07519z^2 + 0.3049z + 0.03273)}{(z^2 - 1.927z + 0.9684)}$$

$$G_{p2Gho} = z^{-3} * \frac{(0.08778z^2 + 0.3597z + 0.03904)}{(z^2 - 1.956z + 1)}$$

Al extraer los polos de las plantas en el dominio del tiempo discreto se pudo observar cinco (5) polos en cada planta; tres (3) polos distintos debido al retardo $e^{-tr s}$, donde tr es el retardo de 0.3 segundos de la planta en el dominio de la frecuencia, y un par de polos conjugados por el denominador:

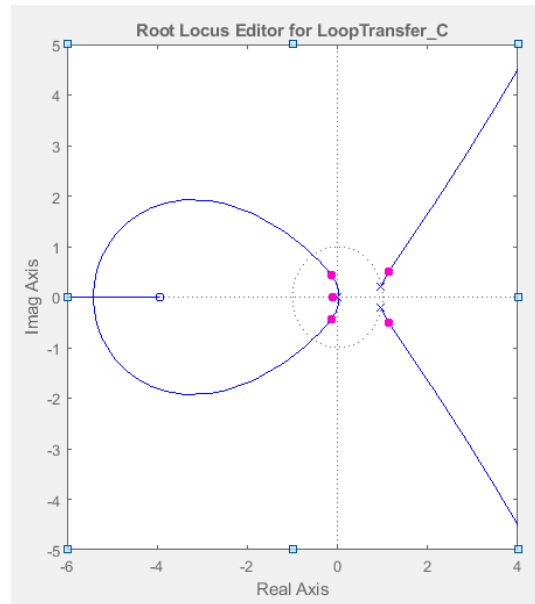
$$P1 = 0.9635 +/ - 0.2001 j$$

$$P2 = 0.9782 +/ - 0.2077 j$$

Posterior a la aproximación de los motores en dominio del tiempo discreto se procedió a hacer uso de la herramienta gráfica de **Sisotool, MATLAB**, para obtención y análisis del lugar geométrico de las raíces (LGR) de los modelos de la planta; al hacer uso de la toolbox y seleccionar la función de transferencia G a estudiar, siendo ésta G_{p1Gho} y G_{p2Gho} , donde en **Root Locus** se pudo observar el comportamiento con sus respectivos polos:

Figura 24.

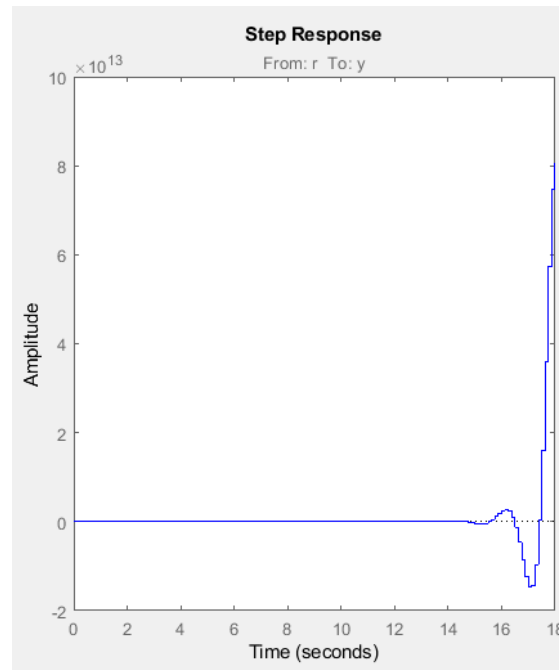
LGR, Motor 1



En la ventana *Step Response* se evidenció que inicialmente la respuesta al escalón tenía como comportamiento el siguiente:

Figura 25.

Respuesta al escalón, Motor 1



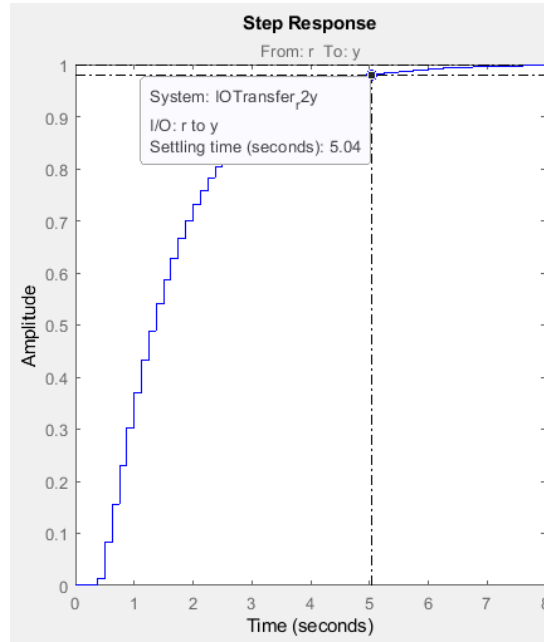
Para la edición del compensador inicialmente se incluyeron los parámetros de diseño en el LGR de tiempo de establecimiento menor a cinco (5) segundos y sobrepico no mayor a 1 %. Se procedió a implementar el controlador PID discreto con un integrador (polo en $z = 1$), polo real en cero (0), y teniendo en cuenta los polos conjugados de cada motor, para contrarrestar su acción, se adicionaron dos ceros complejos conjugados en los puntos respectivos de P1 y P2. Aplicando una ganancia de 0.18 se tiene el siguiente controlador para el modelo de motor 1:

$$G_{c1} = 0.18 * \frac{(z^2 - 1.93z + 0.968)}{(z^2 - z)}$$

Y su respuesta al escalón:

Figura 26.

Respuesta al escalón con controlador, Motor 1



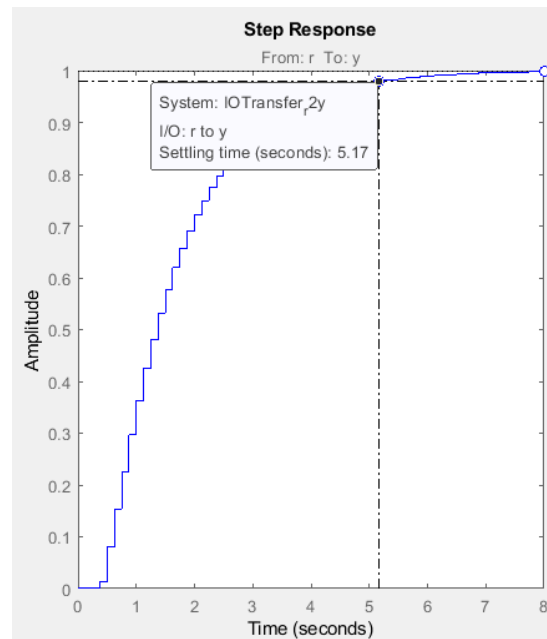
Aplicando el mismo procedimiento con una ganancia de 0.15 se tiene el siguiente controlador para el modelo de motor 2:

$$Gc2 = 0.15 * \frac{(z^2 - 1.96z + 1)}{(z^2 - z)}$$

Y su respuesta al escalón:

Figura 27.

Respuesta al escalón con controlador, Motor 2



Partiendo de la ecuación PID del compensador compuesto

$$PID = \frac{(z^2 (kp + ki + kd) - z (kp + 2kd) + kd)}{(z * (z - 1))}$$

se tiene que para el motor 1 las constantes kd, kp y ki son:

$$kd = 0.18$$

$$2kd + kp = -0.3474$$

$$kp = -0.0126$$

$$ki + kp + kd = 0.174247$$

$$k_i = 0.00684$$

y para el motor 2 las constantes k_d , k_p y k_i son las siguientes:

$$k_d = -0.15$$

$$2k_d + k_p = 0.294$$

$$k_p = 0.0056$$

$$k_i + k_p + k_d = -0.157$$

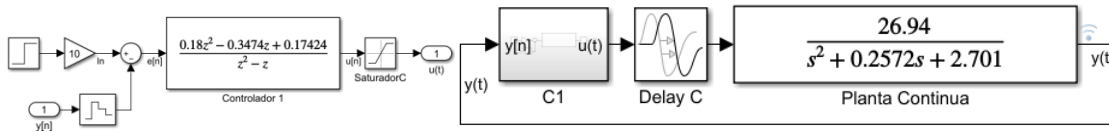
$$k_i = -0.0056$$

Siguiente a esto, en la fase de la implementación del controlador en la plataforma Arduino IDE, se hace uso del método de programación directa para representar los registros y actualizar los valores cada periodo de muestreo de control, 125 [ms], en variables auxiliares visualizando el recorrido de valores actuales y pasados.

Para comprobar los análisis anteriores se procede a realizar la simulación del control de nivel en el software de Simulink, MATLAB, con el cual, en comparación a la herramienta Sisotool, es una aproximación más cercana a la realidad de dicho sistema, por tanto, se establece el siguiente lazo cerrado de control:

Figura 28.

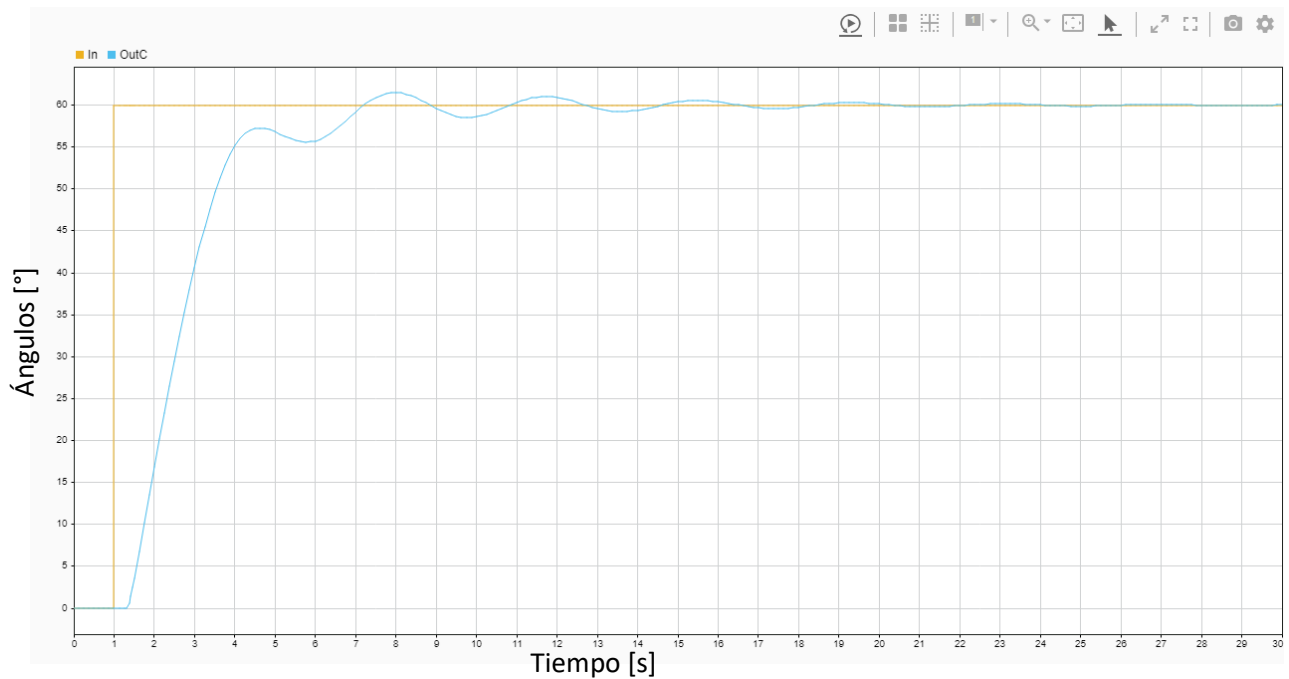
Simulación en Lazo Cerrado con controlador y planta continua, Motor 1

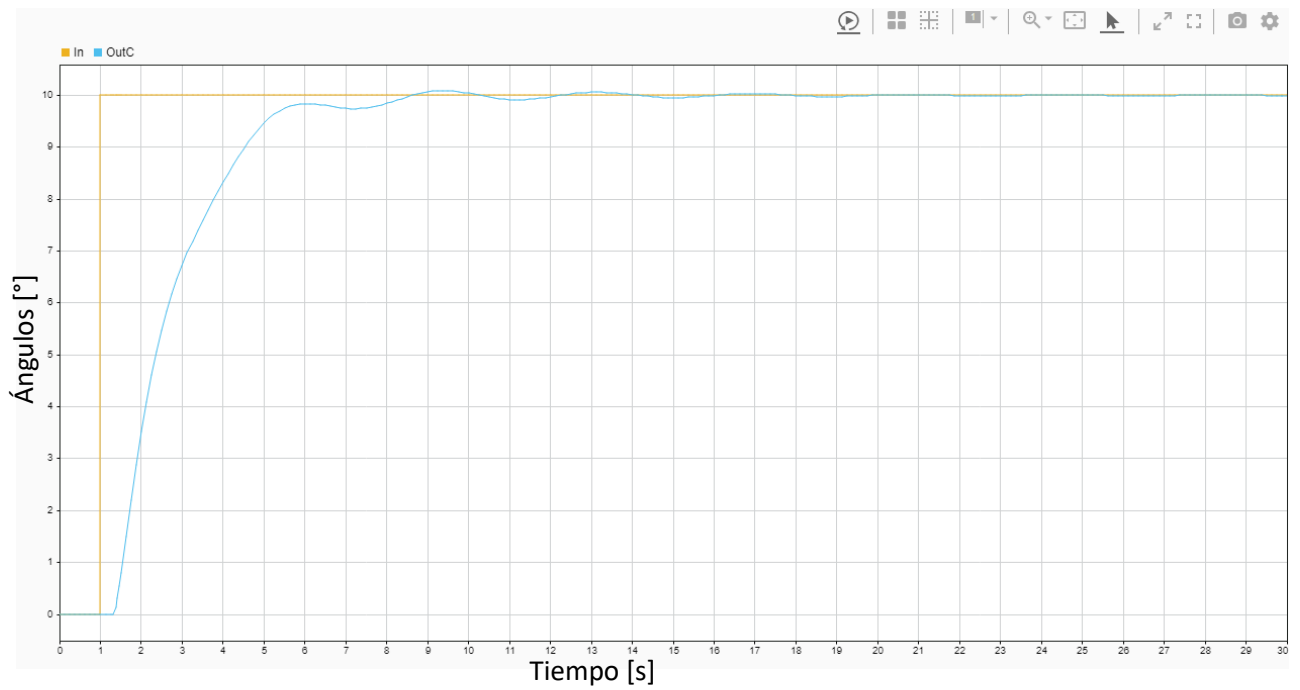
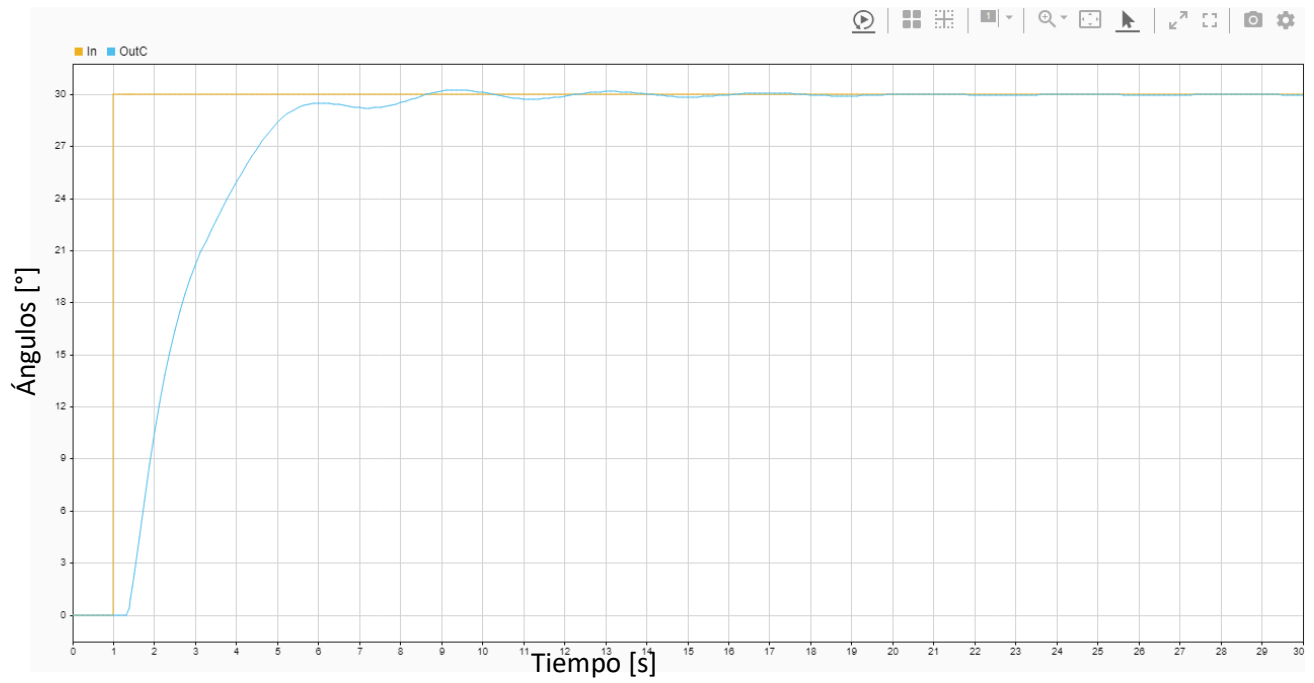


Se tomaron en cuenta como referencia los ángulos de 60°, 30° y 10°, C1 siendo el controlador del modelo de la planta a partir del desplazamiento del motor 1, Planta Continua con su respectivo retardo de 3 segundos y y(t) la salida del sistema.

Figura 29.

Respuesta al escalón con controlador, Motor 1 con referencias 60°, 30° y 10° respectivamente

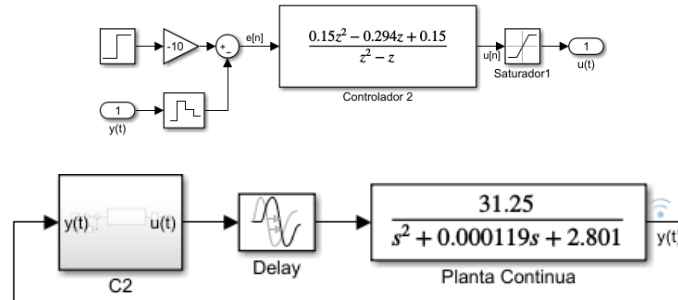




Para el motor 2 se realizó el siguiente lazo cerrado de control:

Figura 30.

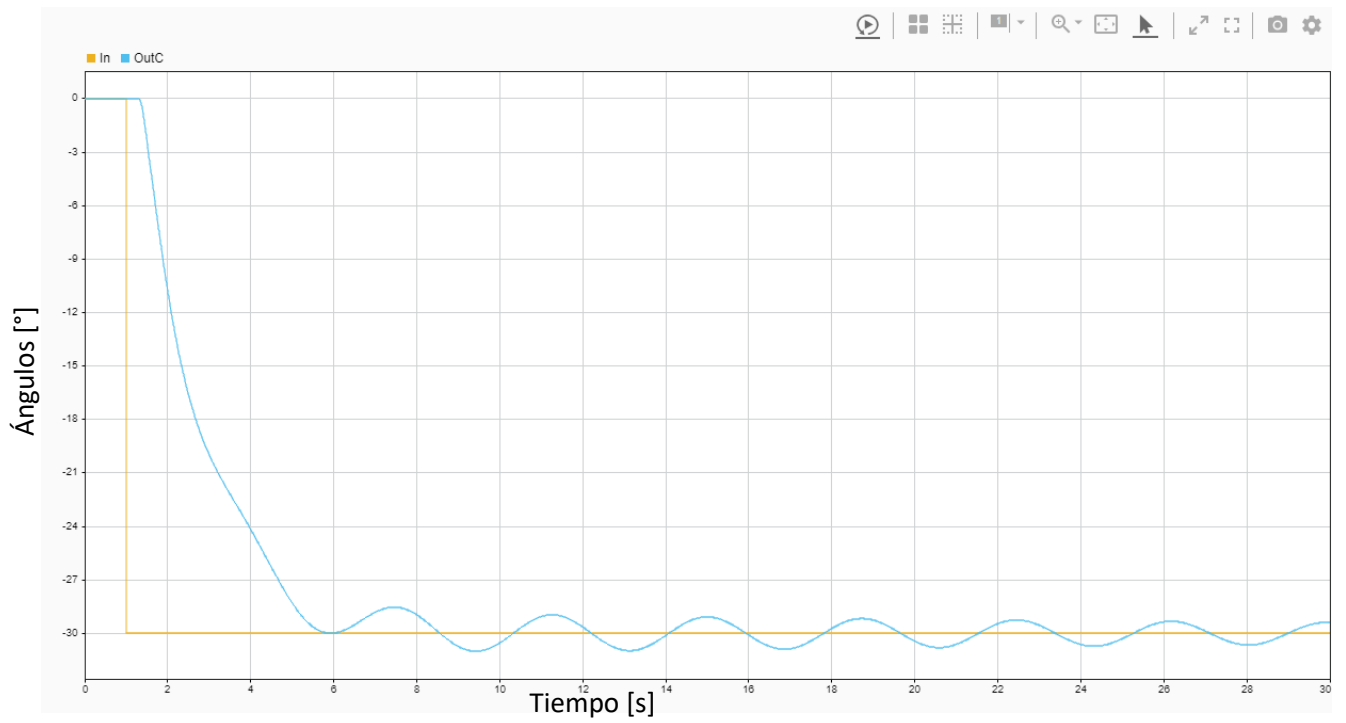
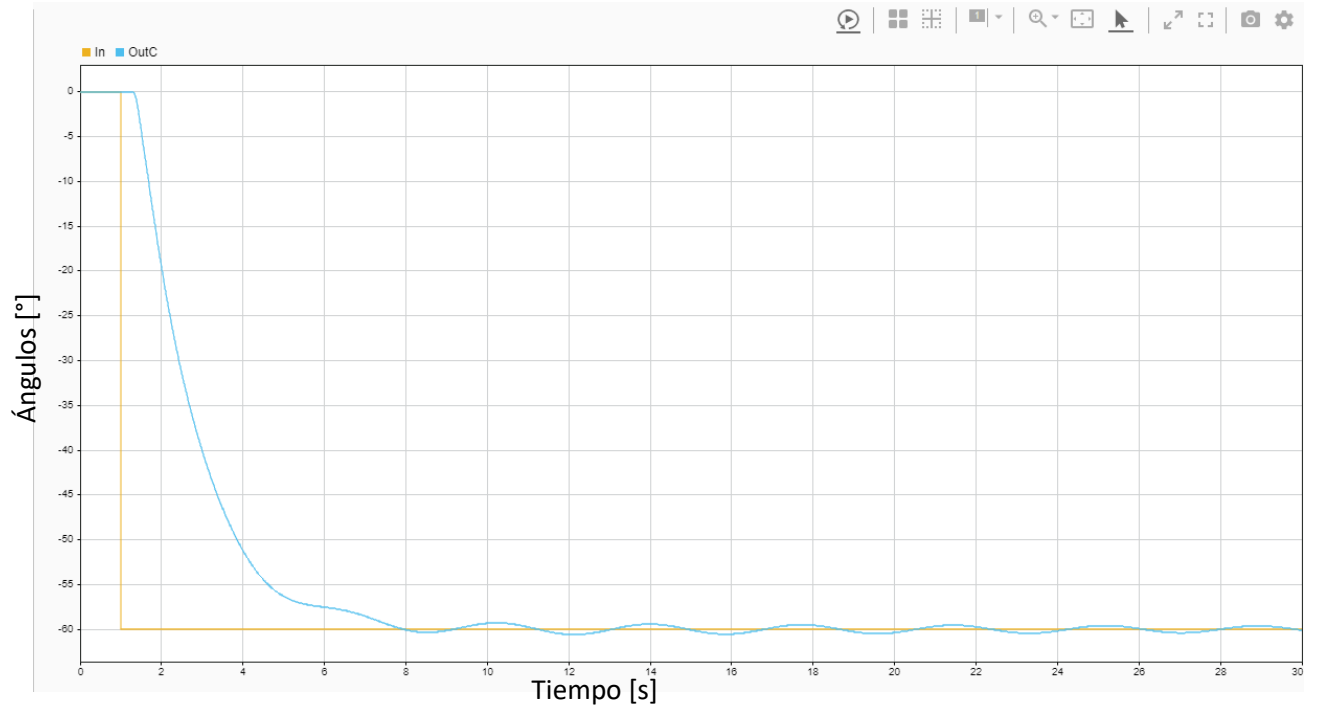
Simulación en Lazo Cerrado con controlador discreto y planta continua, Motor 2

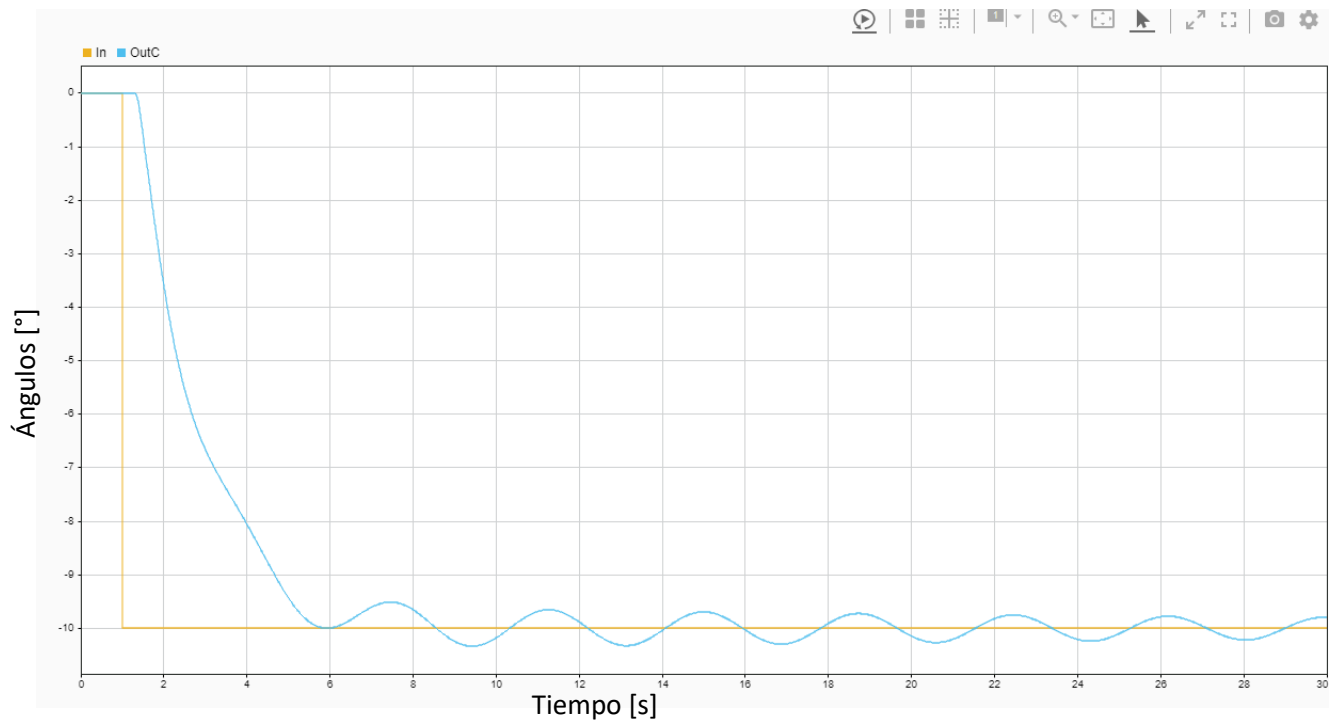


Para la simulación del motor 2 ahora se tomaron como referencia los ángulos de -60° , -30° y -10° , C2 siendo el controlador del modelo de la planta a partir del desplazamiento del motor 2, Planta Continua con su respectivo retardo de 3 segundos y $y(t)$ la salida del sistema.

Figura 31.

Respuesta al escalón con controlador, Motor 2 con referencias -60° , -30° y -10° respectivamente.





4. Resultados

4.1 Montaje

Figura 32.

Montaje electromecánico.

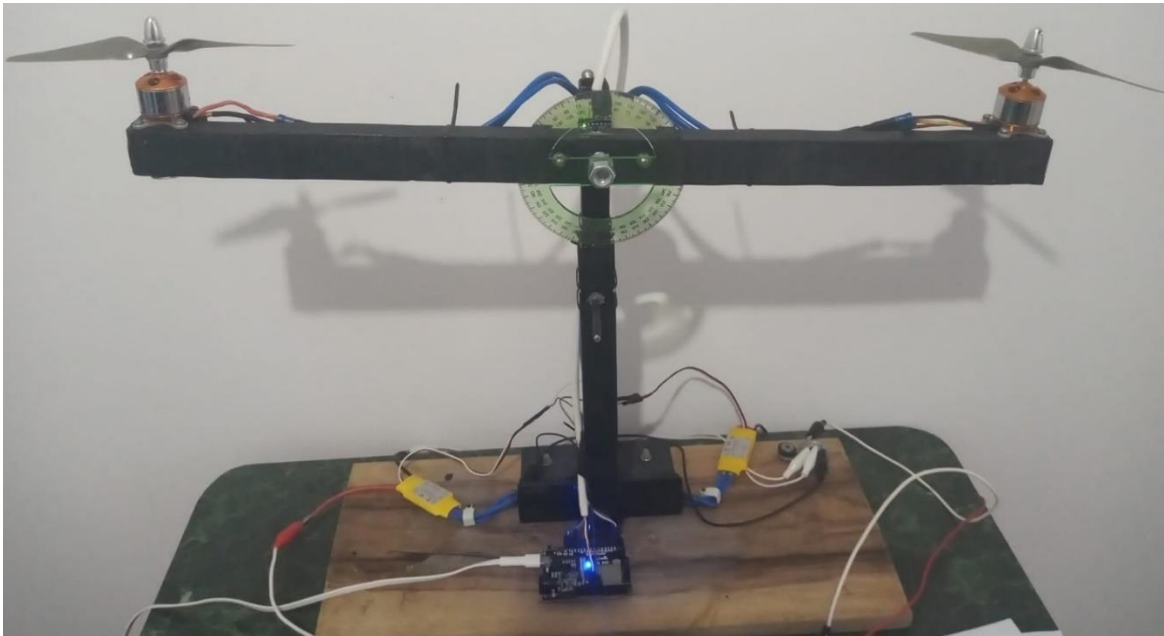
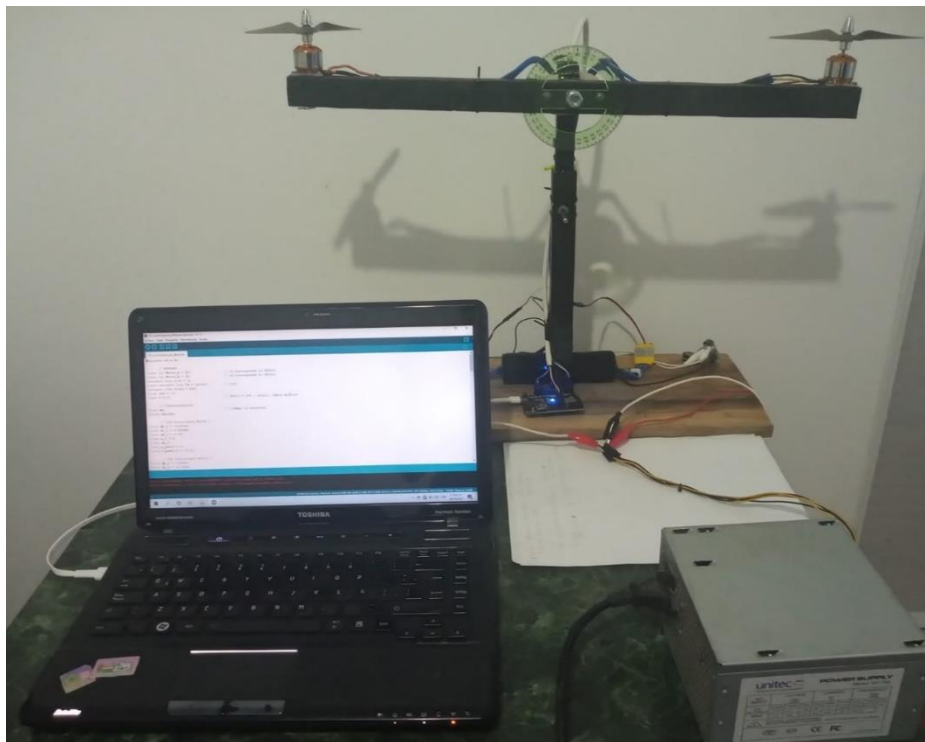


Figura 33.

Montaje electromecánico con fuente de alimentación y control.



4.2 Algoritmo de Control

Para el desarrollo del algoritmo de control se optó por utilizar el microprocesador ESP32 en plataforma Arduino IDE, con base en la librería Wire.h, estableciendo así un protocolo I2C necesario en la comunicación entre las interfaces SCL y SDA para la lectura del acelerómetro, teniendo en cuenta además las siguientes instrucciones (Ver Anexo 2):

Se realizó la declaración de los pines correspondientes a los canales DAC, IO25 y IO26, para los respectivos motores; se inicializan las variables temporales (t_0 y t) que establecen la operación en los ciclos principales del algoritmo, el periodo de muestreo del controlador, el valor apagado (LOW) en PWM, la referencia deseada (ángulo) y el error.

Asimismo, se declaró las variables auxiliares de tiempo previo junto a las constantes proporcional, integral y derivativa calculadas anteriormente en el diseño del controlador PID de cada motor, de igual manera los parámetros del PWM (frecuencia, resolución y respectivos canales).

Se indican la dirección de comunicación I2C y la lectura de los 6 ejes de libertad (DOF) del MPU, 3 del acelerómetro y 3 de giroscopio, de tipo entero de 16 bits; se realiza la conversión de lectura del MPU a valores de unidades de aceleración y velocidad angular; y se hace declaración de 3 *arrays* para las mediciones de acelerómetro, giroscopio y aplicación de filtro complementario.

El algoritmo consta de los siguientes ciclos principales (setup, loop) y funciones adicionales:

void setup:

Se realiza la configuración del PWM (enlace entre canal – frecuencia – resolución), relación entre puerto y canal de los motores, y se asigna a t_0 el tiempo que transcurrió desde la ejecución del programa, *micros()*.

void loop:

Se asigna un tiempo repetitivo a t mientras avanza el programa, se invoca la función MPU, y se establecen dos sentencias condicionales (*if*), una entre los tiempos asignados t_0 y t con el fin de evitar un desbordamiento; y otro ciclo de operación donde se ejecuten las funciones CNTRL, GRAF y la reasignación del valor de t a t_0 .

int MPU:

Se establece relación entre la librería Wire, las interfaces SCL, SDA del acelerómetro, y microprocesador ESP32; y se ejecuta la transmisión. Se realiza la lectura del acelerómetro y giroscopio tomando en cuenta que cada eje posee 2 registros, HIGH y LOW, los cuales se unen para obtener los valores enteros de 16 bits, uno para cada eje.

Teniendo en consideración las medidas de los ejes del acelerómetro se calcula, con relación trigonométrica, el ángulo de inclinación; a su vez, se transforma la medición del giroscopio en unidades de velocidad angular, para finalmente aplicar a ambas operaciones un filtro complementario; filtro pasa alta para giroscopio y filtro pasa baja para acelerómetro.

int CNTRL:

Se calcula el error a partir de la diferencia entre el Setpoint y el ángulo medido, dentro de un condicional se limita la zona muerta a 2° por encima y debajo de la medición para establecer las ecuaciones en diferencias de cada controlador PID (acción de control con respecto a un

error). Se saturan las acciones de control a un rango de trabajo permitido, se reasignan los valores de tiempo previo atribuyendo la señal de control al pin de cada motor.

int GRAF:

Se declara la cadena de datos de entrada y salida en el sistema (periodo de muestreo, ángulo de referencia y medición de acelerómetro).

4.3 Gráficas Experimentales

Se ingresó por teclado del ángulo deseado y por medio del Serial plotter se tuvo como resultado lo siguiente:

Figura 34.

Respuesta del sistema a Setpoint de 10° con ambos Motores

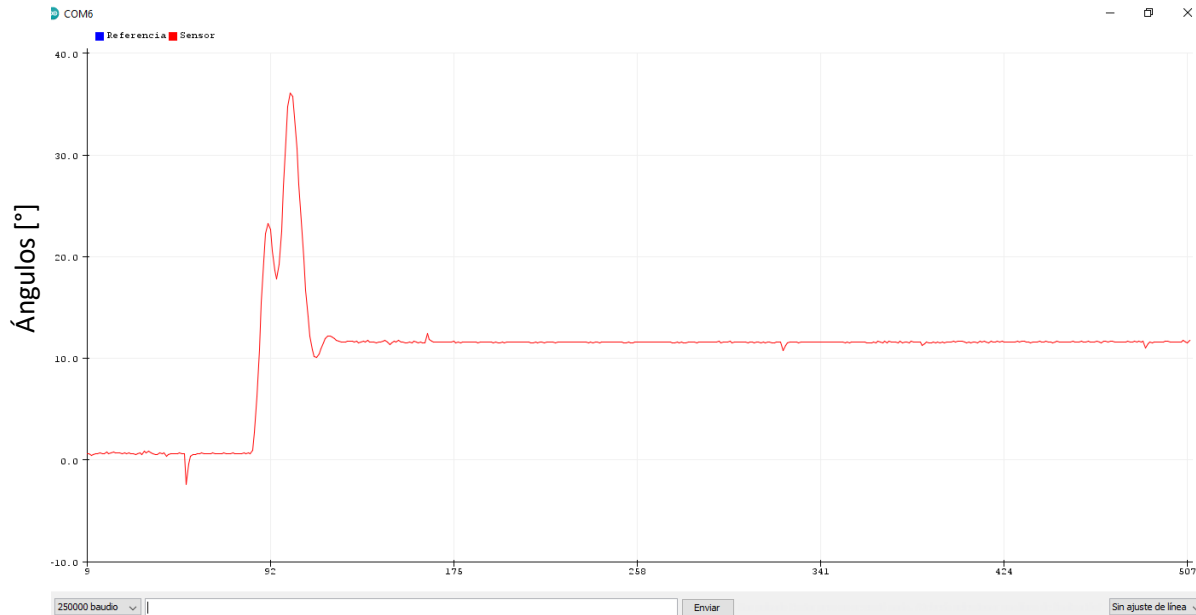


Figura 35.

Respuesta del sistema a Setpoint de -10° con ambos Motores

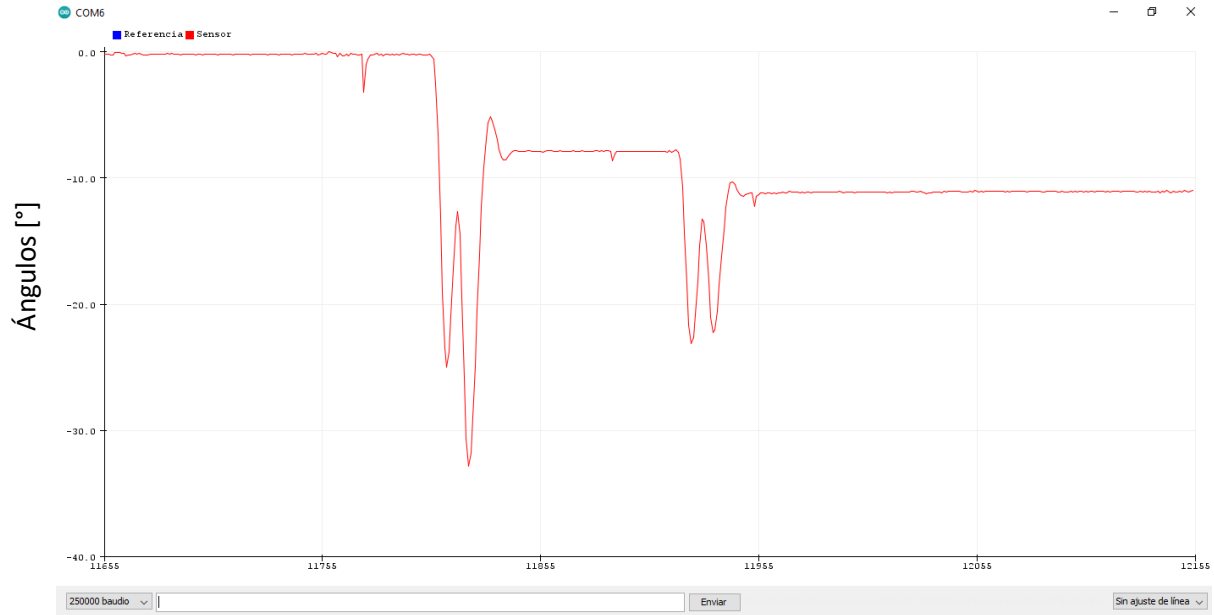


Figura 36.

Respuesta del sistema a Setpoint de 30° con ambos Motores

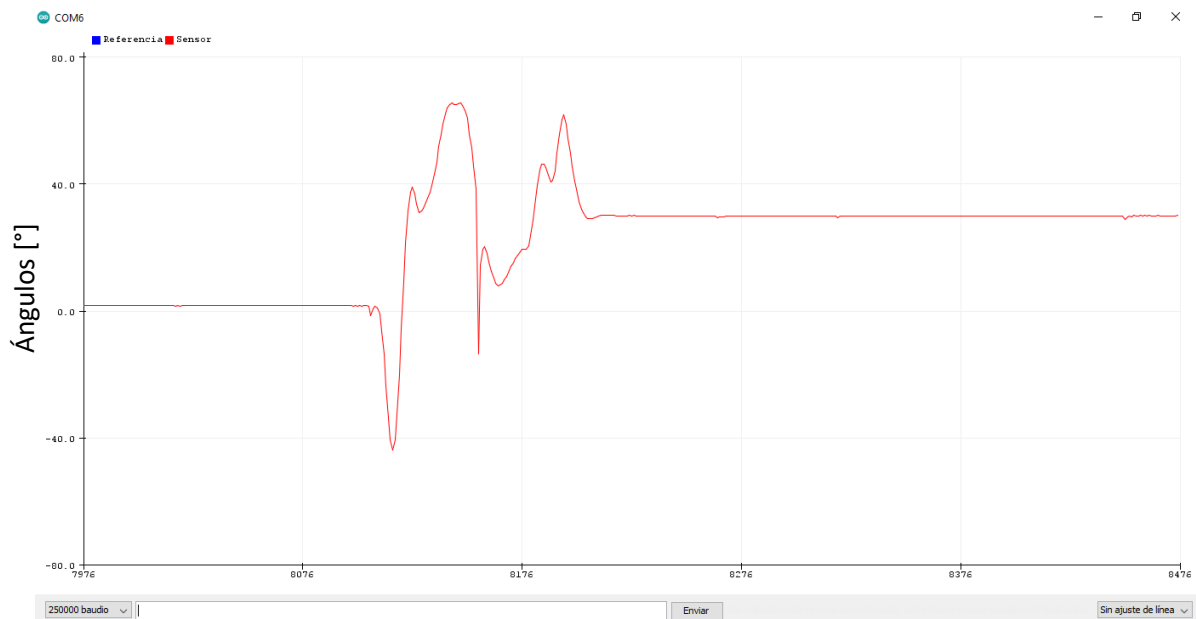


Figura 37.

Respuesta del sistema a Setpoint de -40° con ambos Motores

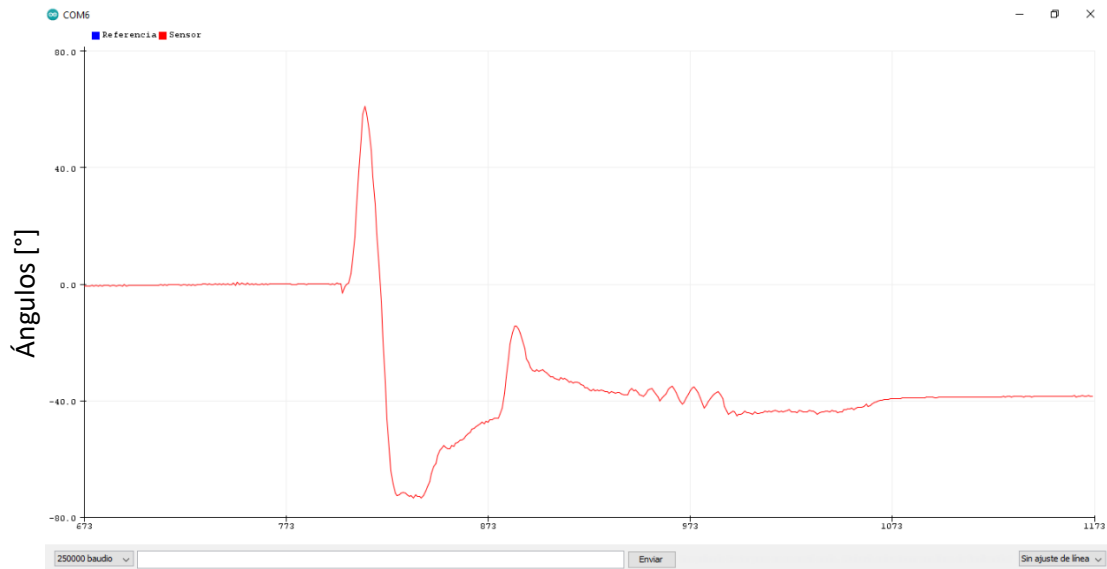


Figura 38.

Respuesta del sistema a Setpoint de 50° con ambos Motores

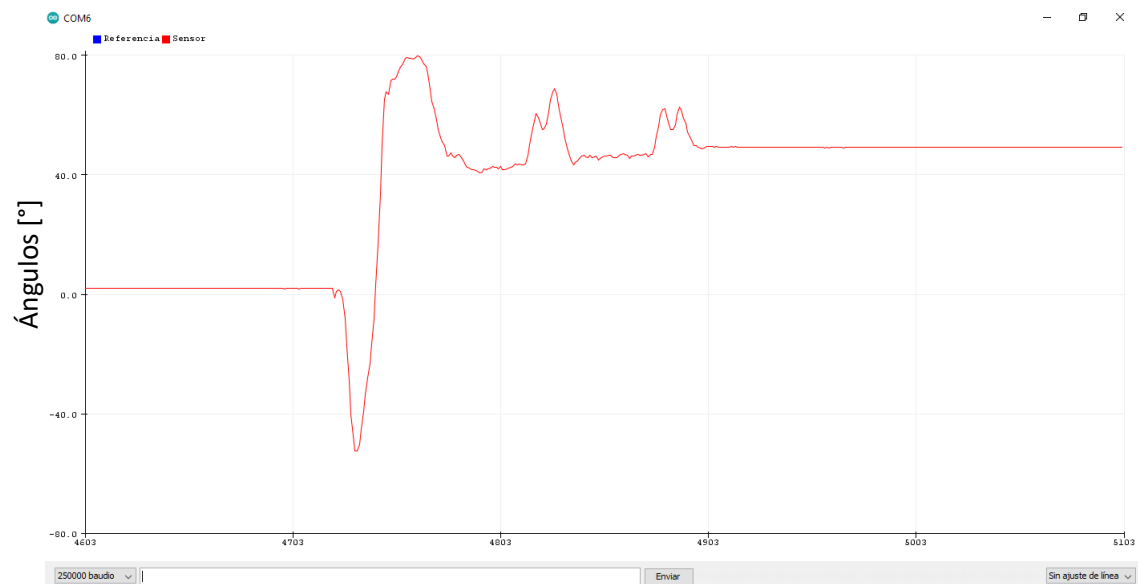


Figura 39.

Respuesta del sistema a Setpoint de -50° con ambos Motores

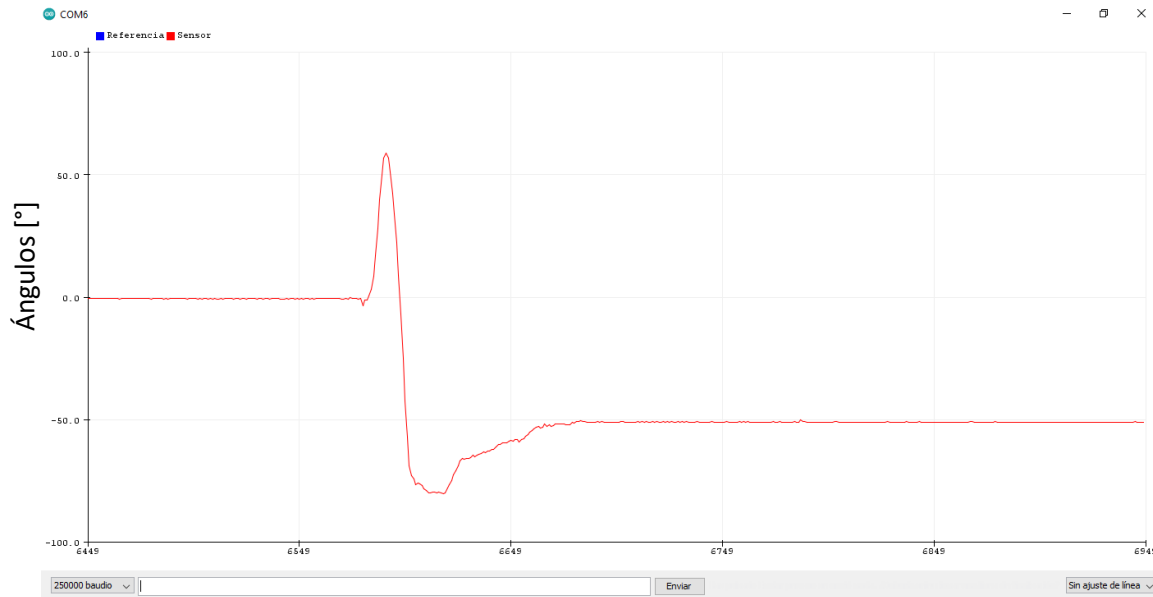


Figura 40.

Respuesta del sistema a Setpoint de 10° a 35° con ambos Motores

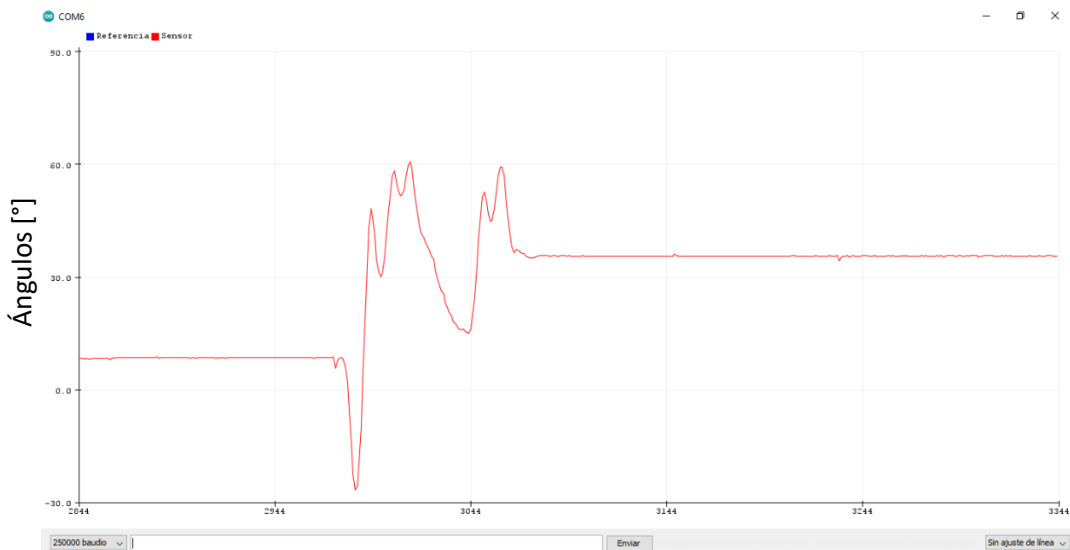


Figura 41.

Respuesta del sistema a Setpoint de -35° a 40° con ambos Motores

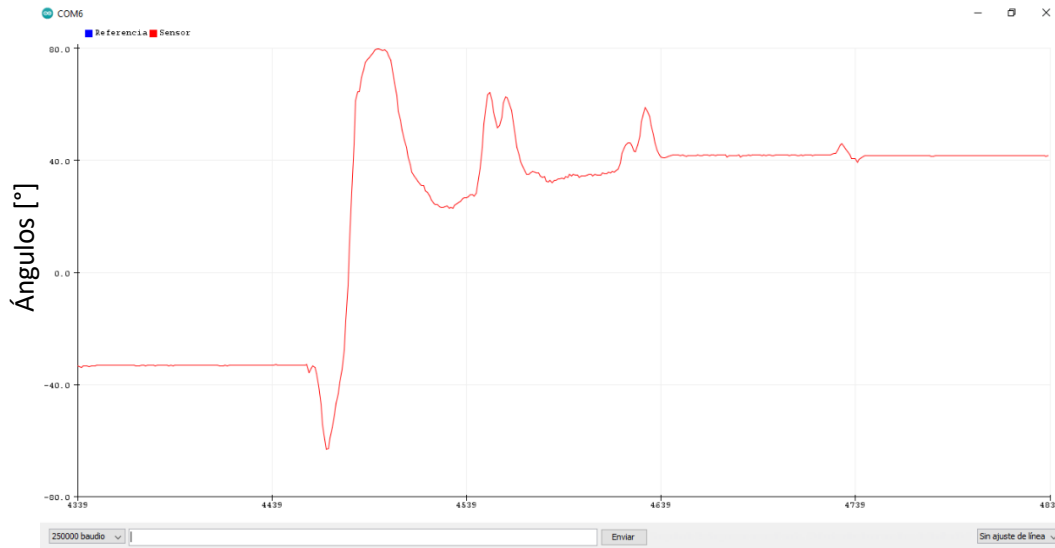


Figura 42.

Respuesta del sistema a Setpoint de 40° a -40° con ambos Motores

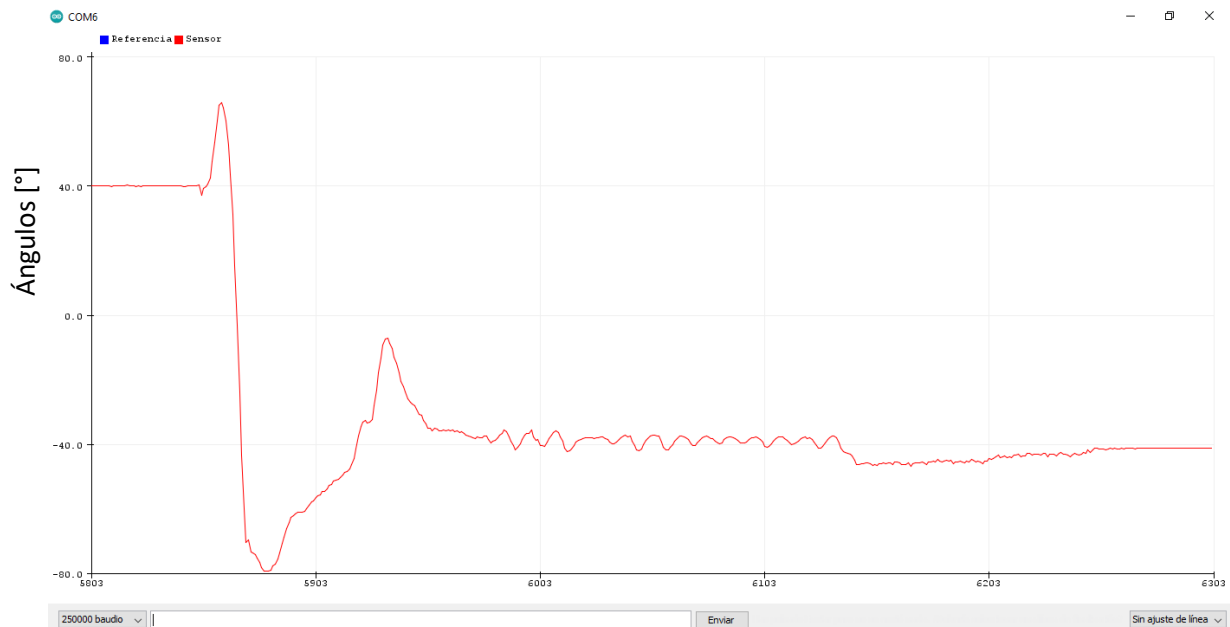


Figura 43.

Respuesta del sistema a Setpoint -60° con Motor 2

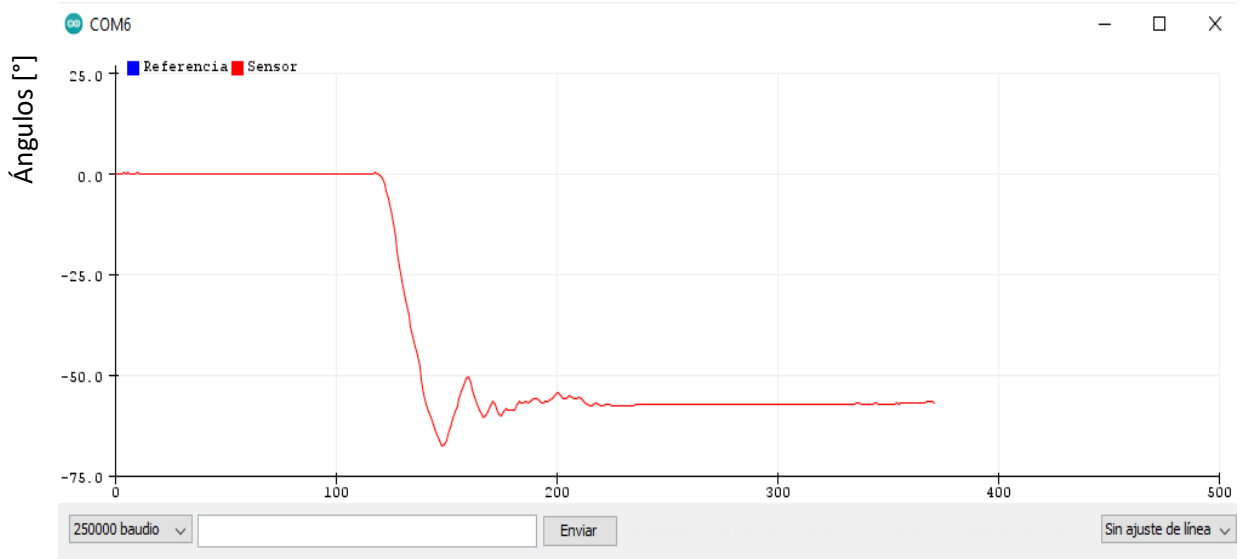
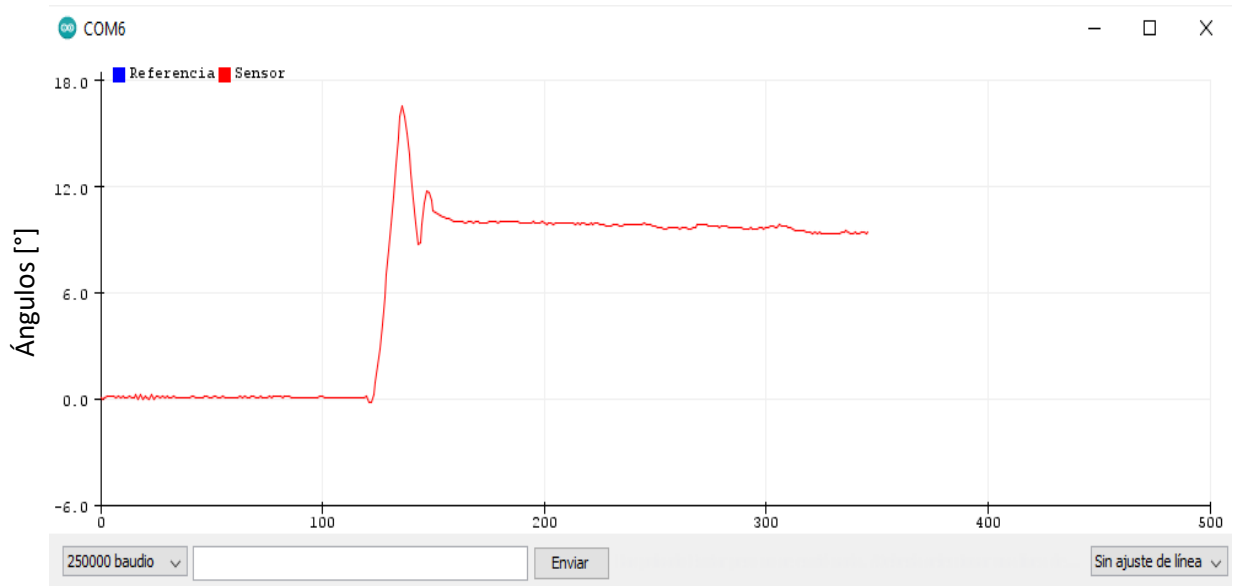


Figura 44.

Respuesta del sistema a Setpoint 10° con Motor 1.



5. Conclusiones

Se logró desarrollar el algoritmo que permite controlar el nivel de inclinación a partir del diseño y construcción de una estructura tipo balancín que soporta motores Brushless y acelerómetro.

Debido a que el diseño de la planta, donde se soportan los motores, es de madera liviana, se presentan vibraciones mecánicas viéndose afectado el acelerómetro MPU 6050 confundiendo así la medida del ángulo con ruido, lo cual causa que se tenga una restricción al momento de realizar la caracterización de los motores con una limitación al ejecutar el barrido; a su vez, por alta sensibilidad del sensor se tuvo en cuenta una tolerancia de 2° , para obtener una mejor respuesta al ángulo referenciado y disminuir la inestabilidad.

Los motores presentaron distintos comportamientos en los cuadrantes I y II, el motor 1, que realiza el barrido de ángulos negativos a positivos, tiene mayor precisión en el cuadrante I (ángulos positivos) mientras que el motor 2, corrimiento de positivos a negativos, se comporta de mejor manera en el cuadrante II (ángulos negativos); no obstante, al encontrarse en puntos medios, como -30° o 30° , tienen una mejor sincronización debido a la similitud en sus puntos de operación.

Para más certeza en la lectura del acelerómetro se aplicó un filtro complementario que actúa como filtro paso alto para la lectura del giroscopio, en caso de rotaciones rápidas, y filtro paso bajo a la señal del acelerómetro, amortiguando variaciones bruscas de aceleración, para compensar ventajas y defectos; este filtro es suficiente y proporciona valores admisibles sin ser indispensable el cálculo de ángulos promedios.

Como medida comparativa entre el sistema implementado en Simulink y los resultados experimentales en el Serial Plotter (Arduino IDE) de los motores de manera individual se puede observar una coincidencia en cuanto al error en estado estable y una breve desviación en la respuesta transitoria, esto debido a afectaciones físicas que en la simulación no se tienen en cuenta.

5.1 Trabajos futuros

Se espera como extensión al proyecto presentado realizar el control digital para un sistema tipo regulador, donde a partir de una referencia constante aparecen perturbaciones al sistema.

Se espera, como trabajo a futuro, un sistema balancín no simétrico, es decir, los motores pueden llegar a estar ubicados en la barra inercial a diferentes distancias con respecto al eje central, o barra fija, con el fin de variar el modelo de la planta y su sistema de control.

Se recomienda realizar mejoras en el diseño de la planta seleccionando un material que emita menos vibraciones y así se mejore la dinámica obteniendo lecturas más certeras del ángulo.

Se espera que para estudios futuros se tome como base la presente planta y se diseñen e implementen distintos compensadores de la teoría de control moderno, como Espacio de Estados.

5.1 Repositorio

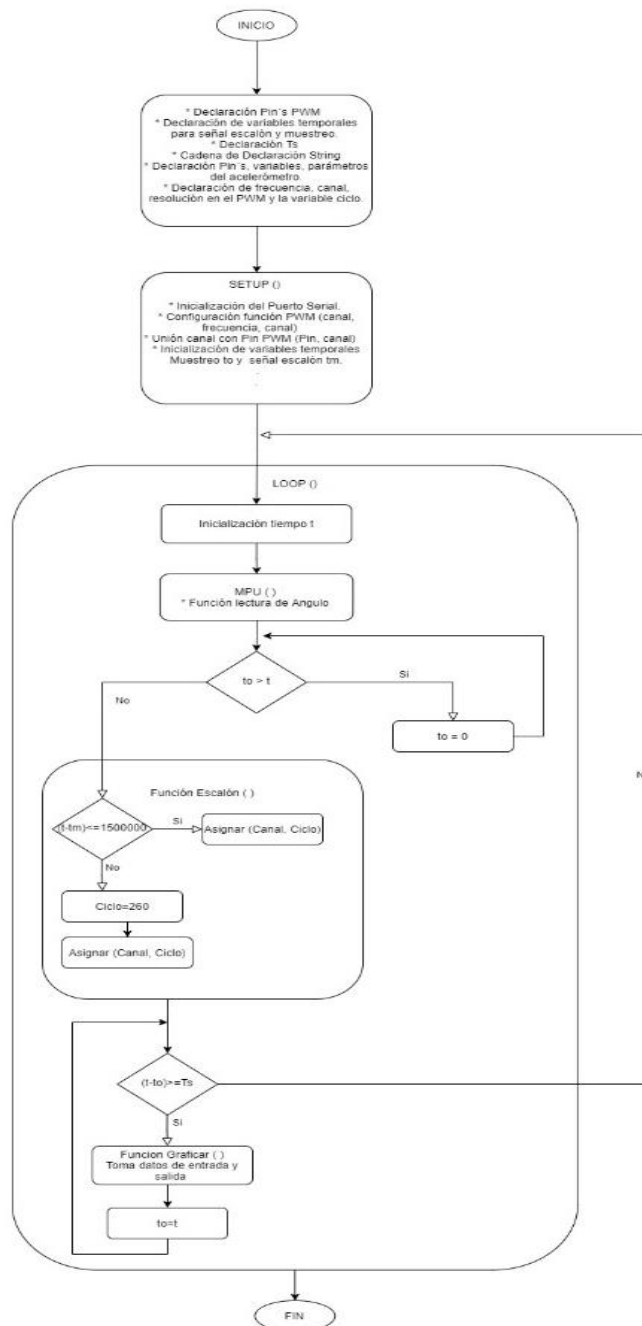
En el siguiente enlace se encuentran los códigos Arduino utilizados para este proyecto, como Calibración de motores Brushless por medio de la ESC, Captura de Datos para para el modelo de planta y algoritmo de Controladores PID digitales:

https://drive.google.com/drive/folders/1jtAT9XpQ7143rWK1fobj3Slj0Sv_3os6?usp=sharin

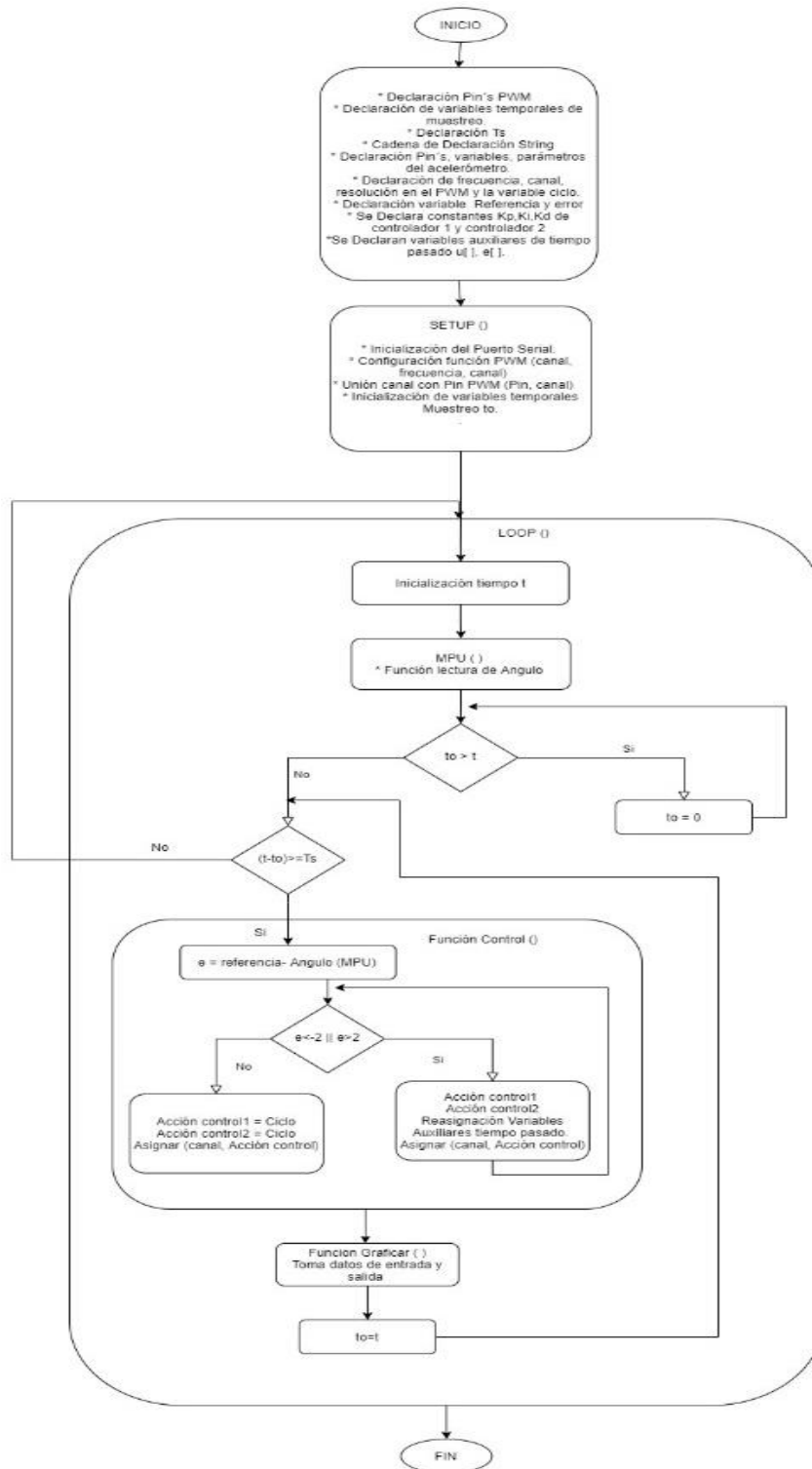
Referencias

- Cotte Corredor, Jorge Mario; Moreno Pineda, Andrés Felipe. Diseño de control robusto de velocidad de motores Brushless para robótica aérea. Universidad Nacional de Colombia, 2010.
- Creus, Antonio. Instrumentación Industrial.
- Fundamentos de programación, McGraw Hill, 2006.
- Mandado, H. Enrique. Perfecto Mariño, Alfonso Lago, Instrumentación Electrónica.
- Pérez López, César. Edición Primera, Springer, MATLAB Control Systems Engineering.
- Quevedo Pillano, Yajaira Selene. Control de un motor de corriente directa sin escobillas, 2013.
- Reyes Sierra, Sergio Andrés. Control híbrido de motores DC sin escobillas usando FPGA, 2013.
- Salt Llobregat, Julián J.; Cuenca Lacruz, Ángel; Casanova Calvo, Vicente; Correcher Salvador, Antonio. “Control Automático, Tiempo Continuo y Tiempo Discreto”. Textos Académicos Universitarios, Editorial Reverté.
- Sánchez Acevedo, Santiago; Giraldo Suárez, Eduardo. “Sistemas de Control en Modelos de Máquinas Eléctricas”. Instituto Tecnológico Metropolitano, Universidad Tecnológica de Pereira, 2009.

6. ANEXOS



Anexo 1. Diagrama de flujo Captura de datos.



Anexo 2. Diagrama de flujo Controladores de los motores.

Apéndices

Apéndice A. Contenido del trabajo de grado.

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS.