



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

CENTRO UNIVERSITARIO UAEM ATLACOMULCO



**“SISTEMA DE CONTROL DE UN DISPOSITIVO MECÁNICO
BALANCEADO POR MEDIO DE DOS HÉLICES”**

T E S I S

Que para obtener el Título de:

Ingeniero en Computación

Presenta:

P. I. C. IVÁN GALLEGOS MIRANDA

Director de Tesis:

DR. JOSÉ ARTURO PÉREZ MARTÍNEZ

Atlacomulco, México; Junio del 2017

RESUMEN

En el presente trabajo, se expone el desarrollo de un sistema de control para la estabilización de un sistema mecánico compuesto por una barra rígida, en cuyos extremos se encuentran acoplados dos hélices a través de motores Brushless. Se tiene un eje de rotación que permite la sujeción de la barra y es el que permite un desplazamiento articulado en un punto de giro; el cual es medido mediante un sensor de posición angular y permite conocer la posición con respecto al eje perpendicular. Se utilizó la plataforma Arduino para realizar la adquisición de datos, además se requirió del uso de un software especializado para establecer la acción de control y la interfaz de usuario donde es posible modificar la referencia del sistema.

ABSTRACT

In the present work, the development of the control system is presented for the stabilization of a mechanical system composed by a rigid bar, in whose ends two propellers are coupled through brushless motors. It has a rotation axis that allows the support of the bar and it is the one that allows an articulated displacement in a turn point, which is measured by an angular position sensor and lets us know the position with respect to the perpendicular axis. It was used the Arduino platform, for performing the data acquisitions, also used the of specialized software to establish the action control and user interface where it is possible to modify the system reference.

ÍNDICE

DEDICATORIAS	ix
AGRADECIMIENTOS	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
ÍNDICE	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xviii
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes	1
2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
2.1 Definición del problema.....	4
2.2 Objetivos de investigación	5
2.2.1 General	5
2.2.2 Específicos	5
2.3 Preguntas de investigación	5
2.4 Justificación.....	5
2.5 Impactos	6
3 HIPÓTESIS	7
4 ESTADO DEL ARTE	8
4.1.1 Teoría del control moderno.....	8
4.1.2 Sistema de control.....	8
4.1.3 Fundamentos teóricos de los sistemas de control.	8
4.1.4 Función de transferencia	9
4.1.5 Diagramas de bloques	9
4.1.6 Sistemas de control en lazo abierto.....	10

4.1.7	Sistemas de control en lazo cerrado	11
4.1.8	Teoría de control moderna	12
4.1.9	Respuesta en estado estable y transitorio de un sistema de control	12
4.1.10	Tipos de controladores	14
4.1.11	Controlador tipo Proporcional-Integral-Derivativo(PID)	15
4.1.12	Métodos de sintonización para controladores PID	16
4.1.13	Respuestas de sistemas ya existentes	23
4.1.14	Preliminares.....	25
4.1.15	Sensores	25
4.1.16	Sensor de posicionamiento angular.....	26
4.1.17	Amplificador operacional.....	27
4.1.18	Arduino	27
4.1.19	Modulación por ancho de pulso	28
4.1.20	Motor sin escobillas (Motor brushless).....	29
4.1.21	Circuito de mando del motor brushless(ESC).....	30
4.1.22	Adaptador I2C para LCD 20x4.....	31
4.1.23	Pantalla de Cristal Líquido (LCD)	32
4.1.24	Comunicación serial.....	33
4.1.25	MATLAB.....	34
4.1.26	Librería Servo.h para Arduino	36
4.1.27	Librería Wire.h para Arduino.....	36
4.1.28	Teoría de Lógica Difusa.....	37
5	METODOLOGÍA	39
5.1	Requerimientos o especificaciones.....	39
5.2	Diseño e implementación	40

5.2.1	Comparación de potenciómetro lineal y convencional.....	40
5.2.2	Circuito de acoplamiento para señal de posicionamiento angular.....	41
5.2.3	Diagrama a bloques de sistema eléctrico.....	43
5.2.4	Diagrama electrónico del sistema completo.....	46
5.2.5	Diagrama de flujo de la programación en Arduino.....	49
5.2.6	Diseño del sistema mecánico.....	50
5.2.7	Modelo matemático.....	50
5.2.8	Obtención de la función de transferencia.....	51
5.2.9	Sintonización.....	55
5.2.10	Diagrama de procesos del sistema.....	58
5.2.11	Programación en Simulink.....	59
5.2.12	Programa completo del sistema de control.....	61
5.2.13	Agregar datos de las variables de control al módulo PID.....	61
5.3	Pruebas del sistema.....	62
5.3.1	Comprobación de función de transferencia con controlador.....	62
5.3.2	Prueba del sistema mecánico con señal escalón.....	64
5.3.3	Habilitación de los circuitos de comando de los motores brushless.....	65
6	RESULTADOS.....	66
6.1	Resultados.....	66
6.1.1	Prueba del sistema con una posición angular de 0°, con respecto a la horizontal.....	66
6.1.2	Prueba de sistema a una posición angular de -20°.....	69
6.1.3	Prueba de sistema a una posición angular de 20°.....	71
6.2	Discusión de resultados.....	74
	CONCLUSIONES.....	75

7	Referencias.....	77
	ANEXOS	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Tabla Pines SDA y SCL [37].	37
Tabla 5.1 Valores de sintonización, método uno [38].	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1 Diagrama de bloques con función escalón de entrada aplicada a una planta.	10
Figura 4.2 Esquema sistema de Lazo Abierto.....	10
Figura 4.3 Diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado.....	12
Figura 4.4 Grafica de la respuesta de un sistema de control a una entrada de tipo escalón [11]......	14
Figura 4.5 Aplicación del método de Ziegler-Nichols a un sistema de control [11].	17
Figura 4.6 Esquema de controlador PID.....	19
Figura 6.11 Comportamiento del sistema PD y PDA [6].	23
Figura 6.12 Respuesta de un sistema con un solo motor y hélice [1].	24
Figura 6.13 Respuesta del sistema con controlador PI.	24
Figura 4.7 Potenciómetro Lineal [24]......	26
Figura 4.8 Amplificador operacional.....	27
Figura 4.9 Ejemplo del uso de la técnica PWM a diferentes ciclos de trabajo [27].	29
Figura 4.10 Motor brushless [28]......	30
Figura 4.11 Circuito de control del motor brushless [29]......	31
Figura 4.12 Módulo I ² C para LCD [30]......	32
Figura 4.13 Pantalla LCD 20*4 [31]......	33
Figura 4.14 Comunicación serial Arduino PC [32].	34
Figura 4.15 MATLAB [33]......	36
Figura 4.16 Diagrama generar de un controlador difuso [11]......	39
Figura 5.1 Comparación de respuesta de un potenciómetro de Precisión y un Genérico	41
Figura 5.2 Circuito de acondicionamiento del sensor de posición angular.....	43
Figura 5.3 Diagrama a bloques del sistema eléctrico.....	43
Figura 5.4 Diagrama de conexión de sensor de posición angular con Arduino.....	44
Figura 5.5 Conexión electrónica de Arduino con motores Brushless.	45
Figura 5.6 Conexión electrónica Arduino, módulo I2C y pantalla LCD.....	46
Figura 5.7 Circuito electrónico de sistema de control.....	46
Figura 5.8 Circuito electrónico de sistema de control.....	48
Figura 5.9 Diagrama de flujo del proceso que realiza la tarjeta Arduino.	49
Figura 5.10 Diseño del sistema mecánico.....	50

Figura 5.11 Función escalón ingresada.....	52
Figura 5.12 Respuesta del sistema a señal escalón.	52
Figura 5.13 Señal graficada en MatLab.	53
Figura 5.14 Función de transferencia obtenida.	54
Figura 5.15 Control PID de una panta [3].....	55
Figura 5.16 Curva experimental en forma de “S” con recta de primer orden.....	56
Figura 5.17 Señal con traslape con atraso de primer orden.	57
Figura 5.18 Diagrama de procesos del sistema.	59
Figura 5.19 Programación de control y envío de datos.....	60
Figura 5.20 Programación de recepción de datos	60
Figura 5.21 Diagrama del programa del sistema de control.	61
Figura 5.22 Ingresar variables de control al módulo PID.	62
Figura 5.23 Simulación de función de transferencia con controlador PID.	62
Figura 5.24 Respuesta del sistema simulado.....	63
Figura 5.25 Respuesta del sistema a una señal de escalón.....	64
Figura 5.26 Ciclo de trabajo.....	65
Figura 6.1 Resultados en una posición angular 0° colocando la masa a 10cm del extremo izquierdo.....	66
Figura 6.2 Resultados en una posición angular 0° colocando la masa a 10cm del extremo izquierdo.....	67
Figura 6.3 Resultados en una posición angular 0° colocando la masa a 10cm del extremo derecho.	68
Figura 6.4 Resultados en una posición angular 0° colocando la masa a 10cm del extremo derecho.	69
Figura 6.5 Resultados en una posición angular -20°	70
Figura 6.6 Resultados en una posición angular -20°	71
Figura 6.7 Resultados en una posición angular 20°	72
Figura 6.8 Resultados en una posición angular 20°	73
Figura 6.9 Respuesta de sistema con lógica difusa	74
Figura 6.10 Respuesta de sistema con control PID de sistema presentado.....	74

1 INTRODUCCIÓN

El controlador PID es un controlador realimentado cuyo propósito es hacer que el error en estado estacionario, entre la señal de referencia y la señal de salida de la planta, sea cero.

El control PID es con diferencia el algoritmo de control más común, siendo utilizado en el 95% de los lazos de control que existen en la industria.

En el presente trabajo, se expone la implementación de un control de estabilización de la posición en una barra con dos grados de libertad, la posición angular con respecto a su eje de giro va a depender de la fuerza de empuje producida por dos motores Brushless acoplados a una hélice cada uno, de manera que controlando la velocidad de giro de ambos motores se regula la fuerza de empuje que actúa sobre la barra y con ello la posición de la misma, el esquema del sistema se basa en lo que cotidianamente se conoce como medio Cuadricóptero.

1.1 Antecedentes

Un sistema de control es un conjunto de elementos que interactúan entre sí, con el objetivo de regular y manipular los procesos que realiza un determinado sistema, con el objetivo de minimizar o eliminar el error y mantener un funcionamiento óptimo del sistema. Existen diversos tipos de control, pero pueden clasificarse en dos grandes áreas como, controles automáticos y manuales [1].

En la vida cotidiana, se interactúa con sistemas de todo tipo, desde modelos sencillos hasta los de mayor complejidad, los cuales en ocasiones no es posible dominar, dado que existen sistemas que funcionan de manera casi automática, sin necesidad de la manipulación del ser humano. También es cierto que sin la acción que realiza el ser humano para que los sistemas se comporten como se desea, estos serían inútiles; a todas esas acciones y decisiones que se toman con base en referencias, patrones y comportamientos se le define como control [2].

El control tiene como objetivo reducir el error de un sistema definido, como la desviación que existe entre la entrada de referencia del sistema (valor deseado) y la salida del mismo (valor medido). El control tiene sus inicios con la intervención directa del ser humano en

sistemas de tipo mecánicos, hidráulicos, electrónicos entre los más comunes. Con el paso del tiempo y el afán del hombre por facilitar los procesos en los que está involucrado, el control evolucionó de los controles manuales a controles automáticos cada día más autónomos y eficaces [2] [3].

En la universidad de Valladolid, España, se realizan proyectos de control, donde se busca efficientizar procesos en el menor tiempo posible; uno de ellos es el control de posición de un balancín con un motor acoplado a un hélice, el cual utiliza un controlador PID (Proporcional, Integral y Derivativo), dicho proyecto cuenta con un motor de DC (Corriente Directa), con una hélice en el extremo de una barra, así mismo el sistema de control fue programado en la herramienta de software Matlab [4].

Otro proyecto realizado en la misma universidad de Valladolid, es el control de posición de un balancín con la plataforma Arduino; este sistema agiliza el tiempo de respuesta para lograr el balance, el tiempo de respuesta se encuentra aproximadamente en 2.52 segundos; lo anterior mediante la implementación de un controlador Proporcional Derivativo, la programación se realizó en la herramienta de software Matlab [5].

En el artículo “*Attitude Stability of Quadcopter Using Classic Control with Angular Acceleration*” presenta la dinámica y el sistema de control para un modelo linealizado de Quadcopter. La parte de control da lugar a la implementación de una nueva acción de control que considera la aceleración angular, más el controlador de Proporcional Derivativo Adaptativo PD-A la compara con el resultado de un controlador de PD convencional. El controlador PD-A tiene como objetivo mejorar la respuesta de un sistema que el PD convencional, se realiza la comparación para demostrar la efectividad de la PD-A sobre la PD, se realizaron estudios teóricos y experimentales basados en un modelo de Quadcopter de un grado de libertad. En el trabajo, se hace uso de MATLAB y Simulink como el software para generar los resultados lo más estables y de mayor eficiencia a los que genera un controlador PD. La comparación entre los resultados teóricos y experimentales reveló una mejora significativa de la estabilidad para la metodología de control propuesta en comparación con la metodología de PD convencional [6].

En la universidad de Piloteo, Colombia, se realizó un Control de posición de un balancín Motor-Hélice, en el cual utiliza un controlador clásico PID, donde se busca disminuir al mínimo el error, realizan la simulación como prueba preliminar para corroborar los resultados de los resultados obtenidos de modelo matemático del sistema. La programación se realizó en el lenguaje Matlab en conjunto con LabVIEW, el dispositivo utilizado para la implementación del control fue en un microcontrolador PIC 18F45550 [7].

En el documento “*Design and Control of a Four-Rotary-Wing Aircraft*” muestra una metodología para el diseño y la construcción de un de avión Quadcopter. Se describen los efectos aerodinámicos que a menudo se presentan en tales vehículos, así como las consideraciones mecánicas para la construcción de los mismos y la instrumentación requerida para su funcionamiento. También se presentan los criterios a considerar para la implementación del controlador PID y los resultados obtenidos de su aplicación para estabilizar el Quadcopter en posición vertical. De forma similar, muestra el tiempo de vuelo obtenido con la instrumentación que se desarrolló. vehículo [8].

En la Universidad del Valle de Toluca fue realizado un proyecto de control, el cual tiene por nombre: “*Control de balanza Aérea mediante Lógica difusa*”, dicho proyecto está conformado por dos rotores acoplados al extremo de la balanza, donde su objetivo es el mantener el equilibrio mediante el uso e implementación de un control difuso. La lógica de control difuso, es realizado mediante Matlab en el cual son propuestas las reglas lógicas difusas. Mediante una etapa de potencia, los comandos de salida son enviadas al sistema mecánico, en este trabajo se obtuvo el equilibrio mediante un control difuso [9].

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Un sistema planteado como un balancín compuesto por una barra rígida, en cada extremo se encuentra ensamblada un motor brushless con una hélice. El sistema tiene la finalidad de mantener funcionando las hélices de manera que, si la velocidad de ambas es la misma, el sistema se encuentra en un balance de modo que la barra se encuentra horizontal. Si ocurre alguna perturbación, es decir, si por alguna razón la barra se inclina hacia algún lado o si una corriente de aire genera que la barra sea desbalanceada el sistema por sí solo se mantendrá en ese estado.

En el año 2013 se realizó un sistema de control el cual tiene por nombre: Control de Balanza Aérea Mediante Lógica Difusa, dicho proyecto está conformado por dos rotores acoplados al extremo de la balanza. El objetivo del prototipo es el mantener el equilibrio mediante el uso e implementación de un control difuso, por tal motivo, el tiempo de respuesta del sistema es de 2.53 segundos.

2.1 Definición del problema

La manipulación del sistema de balancín es a través del manejo de las variables eléctricas que realizan una modificación en la velocidad de los motores que se encuentran acoplados a las hélices, que son motores del tipo sin escobillas, coloquialmente conocidos como *brushless*, por su nombre en inglés.

Cuando el sistema mecánico se encuentra en una posición de equilibrio es deseable que esa posición se mantenga por el tiempo que el usuario del sistema lo requiera, en caso de ocurrir una perturbación, el sistema por sí solo debe tener la capacidad de regresar a dicha posición. Por tal motivo se requiere el diseño e implementación de una interfaz y de la electrónica requerida para que por medio de la interfaz sea establecida la posición de equilibrio y posteriormente, si llega a suceder alguna perturbación, mediante la implementación de un control asociado a la interfaz intervenga para contrarrestar el efecto de la perturbación, en este trabajo se propone un tipo de control tipo PID.

2.2 Objetivos de investigación

2.2.1 General

Diseño e implementación de una interfaz y un sistema de control tipo PID que permita mantener en un estado de pre ajuste del equilibrio, el elemento mecánico conformado por dos motores acoplados a una hélice ubicados en el extremo de una barra rígida.

2.2.2 Específicos

- 1- Realizar una indagación bibliográfica sobre sistemas de control aplicados a sistemas mecánicos similares.
- 2- Realizar una caracterización de respuesta del sistema eléctrico y mecánico.
- 3- Diseño e implementación del sistema de control del balanceo de las hélices.
- 4- Desarrollo e implementación de la interfaz gráfica.
- 5- Puesta a punto del sistema.

2.3 Preguntas de investigación

¿Cómo realizar la caracterización del sistema mecánico para la implementación del controlador?

¿Qué tipo de software es el adecuado para establecer el control de la estabilidad del elemento mecánico conformado por dos motores acoplados a una hélice ubicados en el extremo de una barra rígida?

¿La respuesta del control y del sistema es favorable?

2.4 Justificación

Un sistema de control es un conjunto de dispositivos encargados de administrar, ordenar, dirigir o regular el comportamiento de otro sistema, con el fin de reducir las probabilidades de fallo y obtener los resultados deseados. Por lo general, se usan sistemas de control de producción industrial para controlar equipos o máquinas. El control clásico Proporcional-Integral y Derivativo (PID), que es un sistema de control a lazo cerrado el cual tiene una retroalimentación la cual en presencia de perturbaciones tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y su entrada de referencia.

Mediante la implementación de un controlador PID se busca una mayor eficiencia a la respuesta respecto al tiempo, ya que, por medio de la lógica difusa, la respuesta en tiempo es prolongada, esto se debe a las reglas difusas, a lo que un controlador PID se considera una mejor opción en respuesta con respecto al tiempo, ya que no sigue una serie de reglas sino la respuesta de una ecuación no lineal planteada respecto a una función de transferencia. Por lo que se requiere el desarrollo un sistema de control clásico tipo PID para un dispositivo mecánico conformado por un par de motores con hélice nombrado como balancín.

Por medio de la creación de un sistema de control aplicado al prototipo mecánico de dos motores con hélices se pretende incursionar en el desarrollo sistemas de control para vehículos aéreos no tripulados de tipo multi-rotor, implementando el control será posible asentar las bases para establecer un algoritmo que permita controlar los motores permitiendo contrarrestar los efectos de las posibles perturbaciones.

Agregado a lo anterior, el sistema desarrollado podrá ser utilizado por estudiantes que requieran aprender y fortalecer conocimientos prácticos referentes al área de control. Ya que, por medio de la herramienta a generar, el usuario podrá ser capaz de modificar las variables del controlador PID.

2.5 Impactos

- Tecnológico: El desarrollo de un algoritmo de control que puede ser aplicado en sistemas con configuración similar, también permitirá incursionar en la estabilización de vehículos aéreos no tripulados multi-rotor.
- Social: Servir de apoyo para estudiantes que requieran de conocimientos prácticos en el área de control, ya que permite observar el funcionamiento de los sistemas cuando se modifican las variables del controlador PID y sus efectos en la estabilización del mismo.

3 HIPÓTESIS

Mediante el diseño e implementación de la instrumentación electrónica y la programación en un sistema digital de un control de lazo cerrado será posible mantener de manera automática una posición del sistema mecánico balancín, a través del monitoreo de su posición angular para generar el ajuste de la velocidad de sus motores para que dicha posición se mantenga inclusive si ocurre alguna perturbación en el sistema. Se pretende que la posición inicial sea preestablecida en un intervalo aproximado de -30 a 30° con respecto al eje horizontal.

4 ESTADO DEL ARTE

4.1.1 Teoría del control moderno

En la vida cotidiana se interactúa con sistemas de todo tipo, desde los más sencillos hasta los de mayor complejidad, los cuales en ocasiones no es posible dominar, dado que existen sistemas que funcionan de manera casi automática, sin necesidad de la manipulación del ser humano, también es cierto que sin la acción que realiza el ser humano para que los sistemas se comporten como se desea, estos serían inútiles; a todas esas acciones y decisiones que se toman con base en referencias, patrones y comportamientos se le define como control. El control tiene como premisa reducir el error de un sistema, definido como la desviación que existe entre la entrada de referencia del sistema (valor deseado) y la salida del mismo (valor medido). El control tiene sus inicios con la intervención directa del ser humano en sistemas de tipo mecánicos, hidráulicos, electrónicos entre los más comunes. Con el paso del tiempo y el afán del hombre por facilitar los procesos en los que está involucrado, el control evolucionó de los controles manuales a controles automáticos cada día más autónomos y eficaces [2] [3].

4.1.2 Sistema de control

Un sistema de control es un conjunto de elementos que interactúan entre sí, con el objetivo en común de regular y manipular los procesos que realiza un determinado sistema, con el fin de minimizar o eliminar el error y lograr el funcionamiento óptimo del sistema [10]. Existen diversos tipos de control, pero pueden clasificarse en dos grandes áreas como, controles automáticos y controles manuales, estos se conforman por distintos elementos, descritos en las siguientes secciones [3].

4.1.3 Fundamentos teóricos de los sistemas de control.

Para entender el funcionamiento de los sistemas de control es necesario conocer algunos conceptos básicos, los cuales se definen a continuación [2] [3]:

1) **Variable controlada:** es la cantidad o condición que se mide y controla (salida del sistema) [2] [3].

2) **Planta:** cualquier objeto o medio físico el cual se va a controlar [2] [3].

3) **Proceso:** operación progresiva que consiste en una serie de acciones o movimientos controlados, sistemáticamente dirigidos hacia un resultado o propósito determinados (acción que se va a controlar) [2] [3].

4) **Sistema:** Un sistema es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado [2] [3].

5) **Perturbación:** señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema [2] [3].

4.1.4 Función de transferencia

La función de transferencia de un sistema, es el modelo matemático que describe el funcionamiento de un sistema dinámico, mediante una ecuación diferencial lineal e invariante con el tiempo, constituida por el cociente de la transformada de Laplace de la función de respuesta (salida del sistema), entre la transformada de Laplace de la función de referencia (entrada del sistema), bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales son cero [2] [3]. Lo anterior se representa mediante la siguiente expresión matemática:

$$G(s) = \frac{O(s)}{I(s)} \quad (1)$$

La función de transferencia $G(s)$ determina el funcionamiento del sistema, al relacionar la función de entrada $I(s)$ con respecto a la función de salida $O(s)$, independientemente de sus magnitudes, la utilidad de $G(s)$ es facilitar el análisis del funcionamiento del sistema que describe, si $G(s)$ es desconocida, se puede obtener experimentalmente introduciendo entradas conocidas (entre las más comunes, funciones rampa, escalón e impulso unitario) y observado la salida del sistema.

4.1.5 Diagramas de bloques

Un sistema de control puede tener varios componentes, así, un diagrama de bloques es una representación gráfica de las funciones o modelo matemático (en variable tiempo [t] o Laplace $s=j\omega$) que lleva a cabo cada componente del sistema, mostrando las relaciones existentes entre los diversos componentes; esta representación gráfica presenta la ventaja

de indicar el flujo de las señales del sistema real (izquierda entrada y derecha salida) [11]. En un diagrama de bloques se representan las variables del sistema mediante bloques funcionales, que contiene las funciones de transferencia de los componentes, y se conectan mediante flechas para indicar la dirección de flujo de la señal como se muestra en la Figura 4.1.

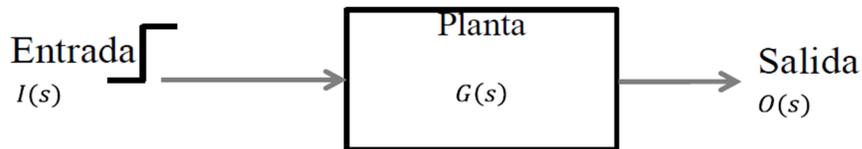


Figura 4.1 Diagrama de bloques con función escalón de entrada aplicada a una planta.

4.1.6 Sistemas de control en lazo abierto

Se definen como los sistemas en los cuales la salida no afecta la acción de control. Un sistema de control en lazo abierto no mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada. En cualquier sistema de control en lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia (véase Figura 4.2). Por tanto, a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija; como resultado, la precisión del sistema depende de la calibración por parte del usuario de manera empírica. Ante la presencia de perturbaciones, un sistema de control en lazo abierto no realiza la tarea deseada. En la práctica, el control en lazo abierto sólo se usa, si se conoce la relación entre la entrada y la salida y si no hay perturbaciones internas ni externas [2].

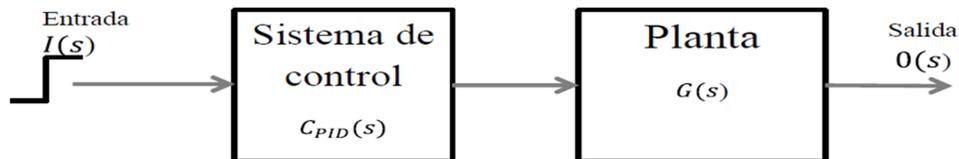


Figura 4.2 Esquema sistema de Lazo Abierto

Nótese en la Figura 4.1 que la salida del sistema nunca interactúa con la entrada o con el controlador, para manipular el proceso y por tanto es imposible corregir el error

automáticamente, por lo tanto, la salida en términos de una función matemática en dominio de Laplace queda:

$$O(s) = C_{PID}(s) * G(s) * I(s) \quad (2)$$

Finalmente, la función de transferencia queda como:

$$F.T_{LA} = \frac{O(s)}{I(s)} = C_{PID}(s) * G(s) \quad (3)$$

donde, $F.T_{LA}$ representa la función de transferencia de un sistema de control en lazo abierto, $C_{PID}(s)$ representa la función de transferencia de un controlador PID y $G(s)$ representa la función de transferencia de la planta.

4.1.7 Sistemas de control en lazo cerrado

Un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador con la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de salida, a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado [11]. En el diagrama de la Figura 4.3 se puede observar como la salida retroalimenta la entrada para poder medir el error y corregirlo en medida de lo posible, expresado esto en términos de una función de transferencia en dominio de Laplace se define como:

$$F.T_{LC} = \frac{O(s)}{I(s)} = \frac{C_{PID}(s)}{1} + C_{PID}(s) * G(s) \quad (4)$$

donde, $F.T_{LC}$ expresa la función de transferencia de un sistema de control en lazo cerrado.

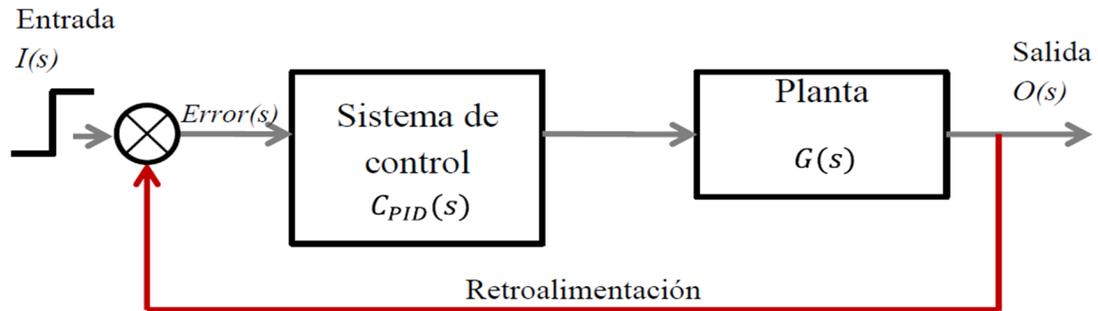


Figura 4.3 Diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado.

4.1.8 Teoría de control moderna

Desde la década de los 60's comenzó la evolución de la teoría de control, debido a la necesidad de alcanzar los requerimientos, cada vez más restrictivos en el desempeño de los sistemas, así como el aumento en su complejidad y el acceso fácil a tecnologías cada día más poderosas, de este modo surge la denominada teoría de control moderna, que es un nuevo enfoque del análisis y diseño de sistemas de control complejos. La teoría de control moderna se aplica a sistemas con entradas y salidas múltiples, que pueden ser lineales o no lineales, en tanto que la teoría de control clásica sólo se aplica a sistemas lineales con una entrada y una salida e invariantes con el tiempo, otro punto importante es que la teoría del control moderna se enfoca esencialmente en el dominio del tiempo, mientras que la clásica se basa en el dominio de la frecuencia [3].

4.1.9 Respuesta en estado estable y transitorio de un sistema de control

Se han descrito algunas de las herramientas para el análisis de un sistema, en primer lugar, un modelo matemático que permita describir el comportamiento del sistema (función de transferencia), así como también representaciones gráficas (diagramas de bloques) con los que es posible manipular fácilmente dichas funciones para su análisis, en segundo lugar, las señales de prueba son funciones del tiempo simples, usadas como entradas para los sistemas y con ellas realizar análisis matemáticos, experimentales y observar el comportamiento del sistema, por lo regular estas señales son funciones escalón, rampa, parábola, impulso y sinusoidal.

Toda vez que se obtiene un análisis del funcionamiento, es preciso realizar la evaluación del desempeño y rendimiento del sistema, este análisis es posible hacerlo mediante la respuesta del sistema, la cual está compuesta por una respuesta en estado estable y una respuesta transitoria, como a continuación se describen:

1. **Respuesta transitoria:** Se hace referencia a la parte de la respuesta que va del estado inicial al estado final.

2. **Respuesta en estado estable:** Se define a la manera en la cual se comporta la salida del sistema conforme el tiempo (t) tiende a infinito [2] [3].

Para conocer el rendimiento de un sistema mediante la respuesta del sistema de control; se utilizan las características más significativas, donde las respuestas en su mayoría son determinadas en el tiempo, debido a que casi todos los sistemas de control, son sistemas en el dominio del tiempo; es decir, deben presentar respuestas de tiempo aceptables (rápidas). La figura 4 ilustra de manera gráfica las características de rendimiento obtenidas de la respuesta de un sistema y que se describen a continuación:

a. Tiempo de retardo **td**: el tiempo de retardo es el tiempo requerido para que la respuesta alcance por primera vez la mitad del valor final.

b. Tiempo de levantamiento **rt**: el tiempo de levantamiento es el tiempo requerido para que la respuesta pase del 10 al 90%, del 5 al 95% o del 0 al 100% de su valor final, suele usarse el tiempo de levantamiento de 10 a 90%.

c. Tiempo pico **tp**: el tiempo pico es el tiempo requerido para que la respuesta alcance el primer pico del sobreimpulso.

d. Máximo sobreimpulso **Mp**: es el valor pico máximo de la curva de respuesta, medido a partir de la unidad. Si el valor final en estado estable de la respuesta es diferente de la unidad, es común usar el porcentaje del máximo sobre impulso.

e. Tiempo de asentamiento **st**: el tiempo de asentamiento o establecimiento; es el tiempo que se requiere para que la curva de respuesta alcance un rango alrededor del valor final del tamaño especificado por el porcentaje absoluto del valor final (por lo general, de 2 a 5%) y permanezca dentro de él [2] [11].

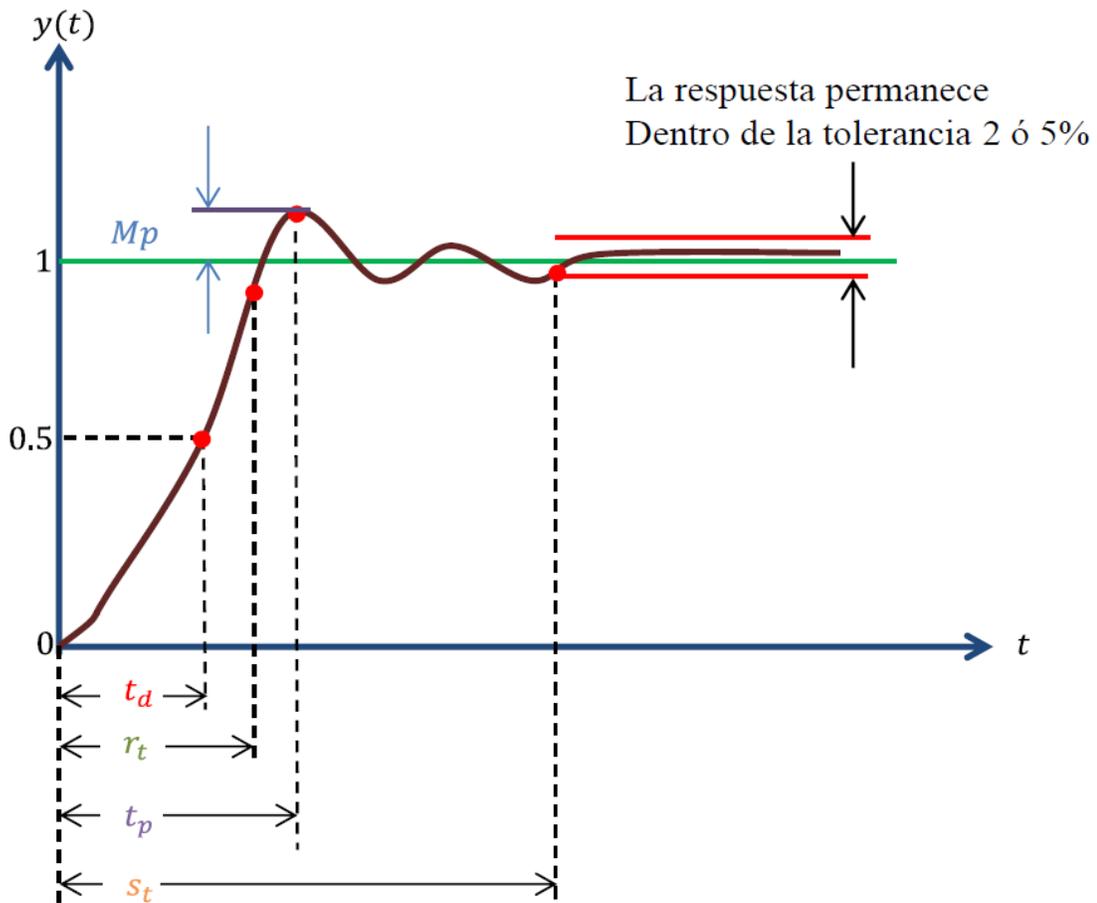


Figura 4.4 Gráfica de la respuesta de un sistema de control a una entrada de tipo escalón [11].

4.1.10 Tipos de controladores

Un controlador automático compara el valor real de la salida de una planta con la entrada de referencia (el valor deseado), determina la desviación o error y produce una señal de control que reducirá la desviación a cero o a un valor pequeño. La manera en la cual el controlador automático produce la señal de control se denomina acción de control [2] [3] [12]. Existen una variedad de controladores, entre los más usados a nivel industrial, se clasifican de la siguiente forma de acuerdo con sus acciones de control:

- a) De dos posiciones o de encendido y apagado (ON/OFF).
- b) Proporcionales.
- c) Integrales.

- d) Proporcionales-integrales.
- e) Proporcionales-derivativos.
- f) Proporcionales-integrales-derivativos.
- g) Difusos.

Aunque también podrían clasificarse según la energía que utilizan para su operación como neumáticos, electrónicos e hidráulicos. Para el caso de estudio de la presente tesis se empleará un controlador tipo PID clasificado de acuerdo a sus acciones de control Proporcional-Integral-Derivativa, aplicado a un sistema de tipo electrónico.

4.1.11 Controlador tipo Proporcional-Integral-Derivativo(PID)

La combinación de una acción de control proporcional, una acción de control integral y una acción de control derivativo se denomina acción de control proporcional-integral-derivativo (PID). Esta acción combina las ventajas de cada una de las tres acciones, la cual la parte proporcional realiza la función de control, la integral para reducir el error en la respecto a la amplitud y la derivada reduce el error respecto al tiempo. Dicha ecuación se define matemáticamente como:

$$G_{PID}(s) = Kp \left(1 + \frac{1}{T_{is}} + Tds \right) = Kp + \frac{KI}{s} + Kds \quad (5)$$

donde $G_{pid}(s)$ representa la función de transferencia de un controlador tipo PID (Kp , Ki , Kd), donde Kp es la ganancia del control proporcional, Ki es la ganancia del control integral y Kd es la ganancia del control derivativo.

En la acción proporcional, el controlador utiliza una "proporción" del error del sistema para controlar el sistema. Su desventaja es que introduce un error de desviación en el sistema. La acción integral, elimina el desfase introducido por el control proporcional, pero introduce un retardo de fase en el sistema y puede producir una respuesta oscilatoria. La acción derivativa por su parte se utiliza para reducir o eliminar el exceso de tiempo y

presenta una acción de avance de fase que elimina el desfase introducido por la acción integral, así como la reducción de oscilaciones estabilizando de esta manera el sistema, así, la suma del efecto de los tres tipos de control integrados en uno solo, tienen un efecto que puede optimizarse de tal manera que se tenga el efecto deseado [2] [3] [12].

El correcto funcionamiento de un controlador tipo PID depende estrictamente de la sintonización de los parámetros de ganancias que lo integran (K_p , K_i , K_d) de ahí la importancia de escoger cuidadosamente el método o técnica con el cual se han de sintonizar dichos parámetros. La sintonización de los parámetros (K_p , K_i , K_d) se refiere al ajuste del valor de los parámetros (ganancias), de tal manera que al combinarse en el controlador PID se reduzca el error del sistema.

4.1.12 Métodos de sintonización para controladores PID

Existe diversos métodos para la sintonización de los parámetros de un controlador tipo PID desde sintonización manual basada en la observación, hasta métodos más sobresalientes, basados en las respuestas gráficas de los sistemas, tal es el caso del método gráfico Ziegler-Nichols el cual logra sintonizar los parámetros del controlador, pero no encontrar los parámetros óptimos para el mismo; a diferencia de estos, existen métodos de búsqueda estocásticos, capaces no solo de sintonizar dichos controladores si no de optimizar los parámetros del controlador tipo PID [2] [3].

A. Método de Ziegler-Nichols.

Este método sugiere reglas para sintonizar los controladores PID (lo cual significa establecer valores K_p , K_i , K_d). Las reglas de Ziegler-Nichols, son muy convenientes cuando no se conocen los modelos matemáticos de las plantas, estas reglas se establecen con base en las características de respuesta transitoria de una planta específica. Existen dos métodos denominados reglas de sintonización de Ziegler-Nichols. En el primer método se limita el sistema a la gráfica de salida del sistema aplicando una entrada escalón ya que la salida de sistema debe adoptar forma de S para poder sintonizar los parámetros y el segundo método requiere de una salida amortiguada para poder establecer las reglas de sintonización, la Figura 4.5 describe gráficamente el funcionamiento del primer método [11].

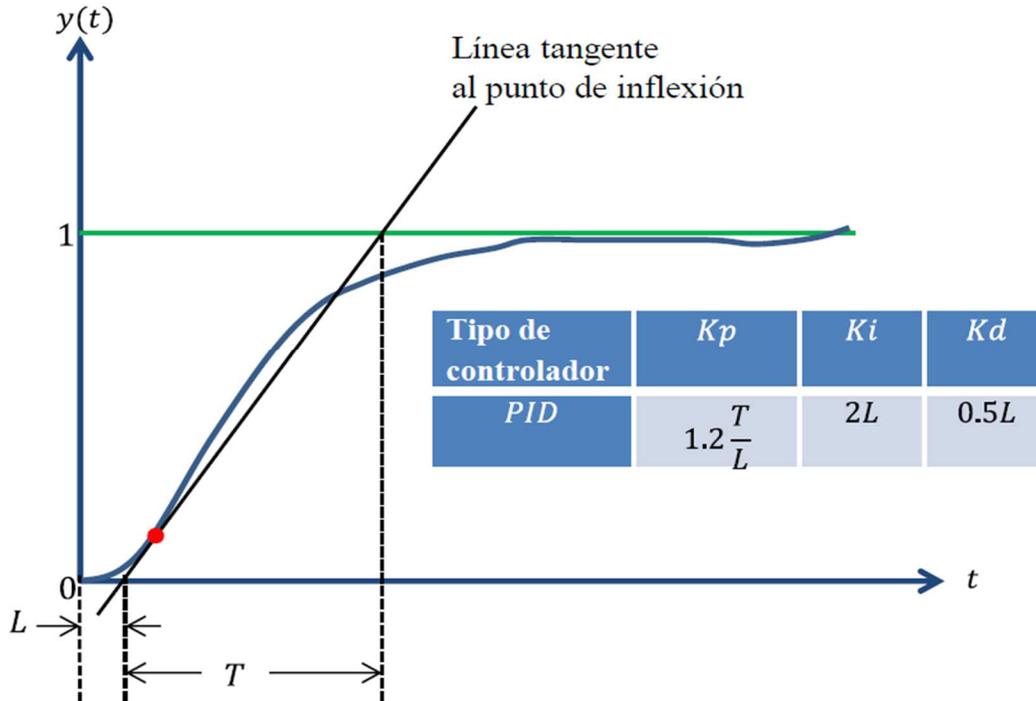


Figura 4.5 Aplicación del método de Ziegler-Nichols a un sistema de control [11].

La Figura 4.5 muestra las reglas de sintonización de parámetros PID mediante el método Ziegler-Nichols, donde L es el tiempo de retardo y T la constante de tiempo. El tiempo de retardo y la constante de tiempo se determinan dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva con forma de S y determinando las intersecciones de esta tangente con el eje del tiempo y la línea de referencia [11].

Limitantes graficas como las de Ziegler-Nichols, permiten que los sistemas mecánicos de tipo balancín tomen cada vez más terreno dentro del área de control, al ser capaz de sintonizar parámetros para los controladores, con tan solo obtener una función objetivo que permita evaluar el rendimiento del sistema con cada posible solución que generada [11].

Existe una gran variedad de aplicaciones de sistemas de control en plantas de procesos industriales tales como petroleras, gaseras, químicas, farmacéuticas, alimentos y bebidas, agua, papel, red de energía, minería, metales, entre otras. Con ello la importancia de las aplicaciones en el mundo real de los conceptos fundamentales de control es un tema clave para el ingeniero que desea especializarse en el área de control de procesos, siendo ésta una oportunidad en el ámbito industrial tanto en la implementación directa para el caso de plantas industriales en funcionamiento, como en la investigación para su diseño,

desarrollo y modificación en equipos experimentales y control de sistemas interrelacionados y complejos [12].

Dentro de la rama de ingeniería existen técnicas que ayudan a ordenar y simplificar la solución de problemas, específicamente en el área de computación son nombrados algoritmos. Éstos corresponden a la descripción de un patrón de comportamiento, expresado en términos de un conjunto finito de pasos, que tiene como objetivo establecer una solución a un problema específico [7].

Con el avance tecnológico y la necesidad de generar sistemas automáticos surge el control, el cual en sus principios eran sistemas de lazo abierto, con ello se tenía una inestabilidad de los sistemas, lo cual fue necesario crear sistemas a lazo cerrado los cuales eran de mayor eficacia. Con ello fue posible generar sistemas de control para el sector industrial los cuales tenían controladores PID. Su principal función es minimizar el error en estado estable [13].

Existen sistemas de control de lazo cerrado y sistemas de lazo abierto, donde el sistema de lazo abierto es aquel que solo actúa el proceso de una señal de entrada y da como resultado una señal de salida independiente a la señal de entrada, pero basada en la primera. Esto significa que no hay retroalimentación hacia el controlador para que éste pueda ajustar la acción de control. Es decir, la señal de salida no se convierte en señal de entrada para el controlador como se muestra en la Figura 4.2 [2]. Mientras que el sistema de un sistema de lazo cerrado va a ser aquel en los que la acción de control está en función de la señal de salida. Los sistemas de circuito cerrado usan la retroalimentación desde un resultado final para ajustar la acción de control en consecuencia. Principalmente es usado en procesos donde no los puede regular el hombre ya que es más estable a perturbaciones [3].

Un sistema de control es un conjunto de dispositivos encargados de administrar, ordenar, dirigir o regular el comportamiento de otro sistema, con el fin de reducir las probabilidades de fallo y obtener los resultados deseados [5]. Para ello es necesario tener un control con el menor error posible, teniendo así un algoritmo del controlador PID, que se refiere la obtención de tres parámetros que son el valor proporcional, el integral y el derivativo. El valor Proporcional depende del error actual. El Integral depende de los errores pasados y

el Derivativo es una predicción de los errores futuros. La suma de estas tres acciones es usada para ajustar al proceso por medio de un elemento de control como se muestra en la Figura 4.6 [3] [12].

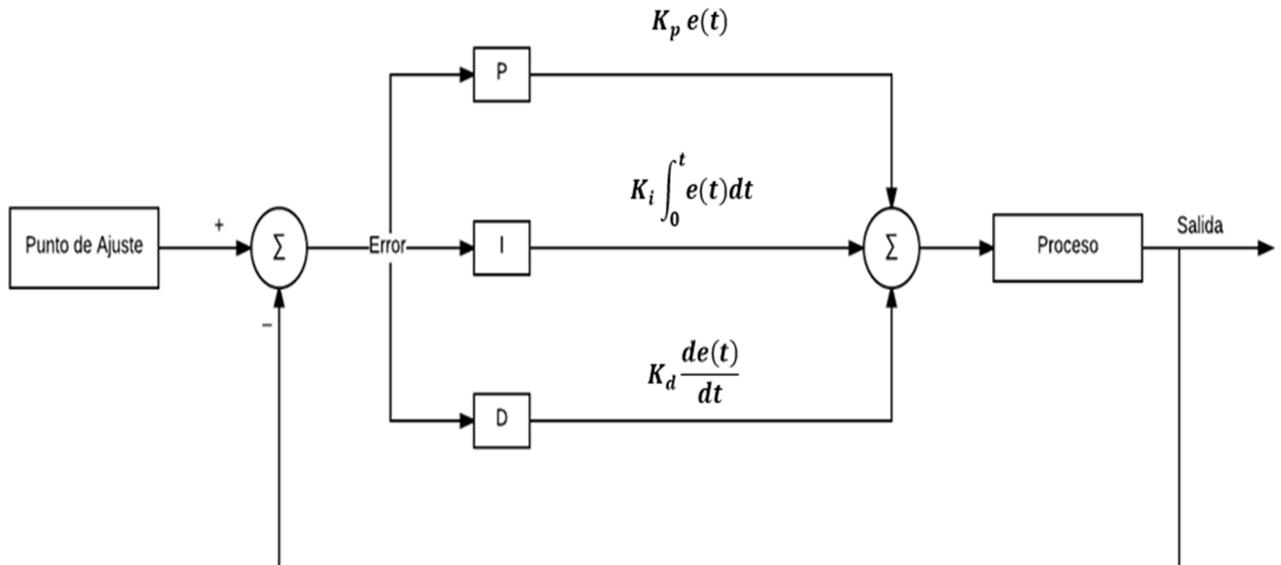


Figura 4.6 Esquema de controlador PID.

La aplicación del control PID ha incitado al desarrollo de investigaciones, en las cuales el principal objetivo es la búsqueda de mejoras, mediante la búsqueda de nuevos métodos y técnicas de sintonización de las estructuras PID. Los controladores PID son de los más utilizados, ya que operan en la mayoría de procesos lineales invariantes en el tiempo, son de una entrada y una salida [12]. Teniendo la sintonización del controlador es necesario la realización del proceso de optimización, entre las cuales se pueden mencionar las de Ziegler y Nichols (1942), Cohen and Coon (1953), O'Connor and Denn (1972), Borresen and Grindal (1990), Connell (1996) y Sycros and Kooks (2005) [3].

Para la realización de sistemas de control con hélices es necesario conocer las especificaciones de los motores, específicamente se requiere conocer el voltaje de polarización, el consumo de corriente y la velocidad de giro. [14].

Una aplicación del controlador PID se encuentra en la estabilización de un péndulo invertido aplicando control predictivo basado en el modelo (MPC) y un regulador lineal cuadrático (LQR), dicho trabajo afirma una perspectiva de eficacia, mediante la obtención

de respuestas que son comparadas para de esta manera determinar cuál es el sistema de control más conveniente a dicha problemática [15].

En el artículo “*Design of Neural Network PID Controller Based on Brushless DC Motor*” realizan un sistema de aprendizaje sobre el comportamiento de los controladores PID en torno al funcionamiento de los motores sin escobillas, los cuales mediante la simulación de una red neuronal Back Propagation diseñada en Matlab / Simulink, donde se generó una simulación a diferentes niveles de estrés de los motores, y por medio de inteligencia artificial, los resultados de simulación indican que el controlador PID en una red neuronal se mejora la respuesta de los motores, además mediante su implementación a Vehículos Aéreos no tripulados los motores tendrán un mejor desempeño dependiendo del trabajo que se les exija [16].

Con ayuda del entorno de desarrollo visual Simulink de Matlab, es posible trabajar con programación a bloques y así mismo la manipulación de sistemas de control por medio de comunicación serial con una tarjeta de adquisición. En la actualidad existen proyectos en los que los sistemas los elaboraron en el entorno de desarrollo visual Simulink y la plataforma Arduino como un dispositivo de adquisición de la señal de referencia y como intérprete de la salida de control [3] [4]. La principal función de los sistemas es la demostración del funcionamiento a lazo cerrado y lazo abierto, mencionando los creadores de dichos sistemas es que el sistema es lento ya que la estabilización tarda alrededor de 2 segundos, ya que se menciona en dichos proyectos que la barra rebota y genera que el sistema tarde en estabilizarse [5].

Mediante la comparación entre un controlador Difuso y un PID, el autor Díaz J. y Muñoz F. dicen que ambos son buenos, pero todo va a depender de la problemática a la que nos enfrentemos, de tal motivo que para la problemática aplicada a la estabilidad con problemas lineales es preferible la utilización de un controlador PID, ya que si se utiliza un sistema de control Difuso la respuesta en tiempo tiende a ser más lenta, esto se debe las reglas difusas, de tal motivo que la lógica difusa se enfoca en dar respuesta a sistemas no lineales [13].

La implementación de control a vehículos aéreos no tripulados de tipo multi-rotor, se ha posicionado en los primeros lugares de inversión en la industria armamentista, paquetería

y cinematografía, ya que la implementación a vehículos aéreos no tripulados es de gran utilidad, buscando grandes beneficios como: creación de armas tripuladas a distancia, el análisis geográfico, en la industria cinematográfica para la obtención de tomas en otros ángulos, así mismo también en la industria de entregas de paquetería (Amazon) [17]. Por lo que es indispensable la implementación de control de estabilidad en este tipo de vehículos, que aún son manipulados por un usuario y lo que se pretende es hacer que el dispositivo sea autónomo.

Los vehículos micro aéreos (MAV) tienen una amplia aplicación como el reconocimiento militar, el estudio meteorológico, el monitoreo ambiental y otros aspectos. Para el control del comportamiento del indicador de Actitud (Un Indicador de Actitud (IA), también conocido como horizonte artificial, es un instrumento de vuelo que muestra la orientación de la aeronave respecto al horizonte. Con él se puede conocer rápidamente el ángulo de alabeo y cabeceo. Gracias a este instrumento, es posible volar en condiciones de visibilidad reducida o nula), se propone un nuevo método utilizando tres giroscopios y un acelerómetro triaxial para estimar la información del ángulo de actitud. A continuación, con el modelo lineal aproximado obtenido mediante la identificación del sistema, se aplica la técnica de control de modo de deslizamiento de referencia de modelo (MRSMC) para mejorar la robustez. En consideración al modelo de altitud relativamente constante, se adopta un controlador lineal cuadrático gaussiano (LQG). Los resultados experimentales al aire libre demuestran la estabilidad y robustez superiores de los controladores [18].

Se presenta una estrategia de control de actitud basada en las reglas de Ziegler-Nichols para ajustar los parámetros PD (proporcional-derivativo) de los helicópteros quadrotor para resolver el problema de que el quadrotor tiende a ser inestable. Este problema es causado por el estrecho dominio de definición de los ángulos de actitud de los helicópteros quadrotor. El controlador propuesto es no lineal y consta de una parte lineal y una parte no lineal. La parte lineal es un controlador PD con parámetros PD ajustados por las reglas de Ziegler-Nichols y actúa sobre el sistema lineal desacoplado quadrotor después de la linealización de retroalimentación; La parte no lineal es un elemento de linealización de retroalimentación que convierte un sistema no lineal en un sistema lineal. Puede verse a partir de los resultados de la simulación que el controlador de actitud propuesto en este

documento es muy robusto, y su efecto de control es mejor que los otros dos controladores no lineales. Las partes no lineales de los otros dos controladores no lineales son los mismos que el controlador de actitud propuesto en este documento. La parte lineal involucra un controlador PID (derivado proporcional-integral) con los parámetros del regulador PID ajustados por las reglas de Ziegler-Nichols y un controlador PD con los parámetros del controlador PD ajustados por GA (algoritmos genéticos). Además, este controlador de actitud es simple y fácil de implementar [19].

En este proyecto “*Design of an intelligent fuzzy logic controller for a quadrotor helicopter*” se realiza la obtención de un modelo de caja negra para la dinámica de tono de actitud de un helicóptero quadrotor. Y dos controladores de lógica difusa son diseño utilizando diferentes números de reglas y métodos de ajuste. A continuación, el controlador de lógica difusa con el mejor rendimiento se compara con un controlador derivativo integral proporcional. Los resultados muestran un mejor rendimiento que fue alcanzado por el controlador de lógica difusa que contiene un mayor número de reglas. Y el controlador de lógica difusa tiene un mejor rendimiento que el controlador proporcional integral y derivativo [20].

Este trabajo “PID, LQR and LQR-PID on a Quadcopter Platform”, presenta una comparación entre diferentes controladores a utilizar en un modelo dinámico plataforma quadcopter. Los controladores asumidos en este trabajo son un PID sintonizado ITAE, un controlador LQR clásico y un PID sintonizado con un bucle LQR. Los resultados se obtuvieron mediante simulaciones para 10 actitudes diferentes del quadcopter, sin embargo, en este trabajo los resultados de simulación se presentarán sólo para la actitud vertical [21].

Modelado, identificación del sistema y el controlador para cuatro rotores de longitud variable. El modelado se obtuvo utilizando el método de Newton-Euler, luego la pequeña teoría de la perturbación se utilizó para la linealización. El algoritmo de Plackett se utilizó para la identificación del sistema para predecir los parámetros del sistema. El objetivo principal de este trabajo es el problema de la variación en masa, y el cambiar los parámetros del sistema fue discutido en detalle. Los parámetros del sistema se actualizan en tiempo real durante el vuelo con tiempo de muestreo bajo. El controlador PD de un

quadcopter fue también en tiempo real basado en el cambio de la salida de identificación del sistema. La actitud y el control de altitud del rotor cuádruple se presentó utilizando un controlador clásico adaptativo. Ahora él se puede simular un rotor cuádruple con masa variable. El objetivo de este trabajo es hacer que el quadcopter volar durante mucho tiempo y ser robusto para los insumos variables viene de la correa. La simulación genero los resultados de la identificación del sistema y las respuestas de control de la actitud y la altitud se presentan en dicho trabajo. La perturbación del viento también se consideró en el diseño del controlador [22].

4.1.13 Respuestas de sistemas ya existentes

Así mismo, es posible observar que mediante la utilización de un sistema de control PID en comparación con PD y un PDA, el tiempo de respuesta se realiza en un menor tiempo, así mismo, el sistema PDA genera pequeños picos, mediante con el controlado PID no se encuentran dichos picos, obsérvese en la Figura 6.1.3.2. El controlador PD y PDA no cuentan con la parte integral para reducir el error respecto a la amplitud. En la Figura 6.1.3.4 es posible observar el comportamiento del sistema con un controlador PD y PDA.

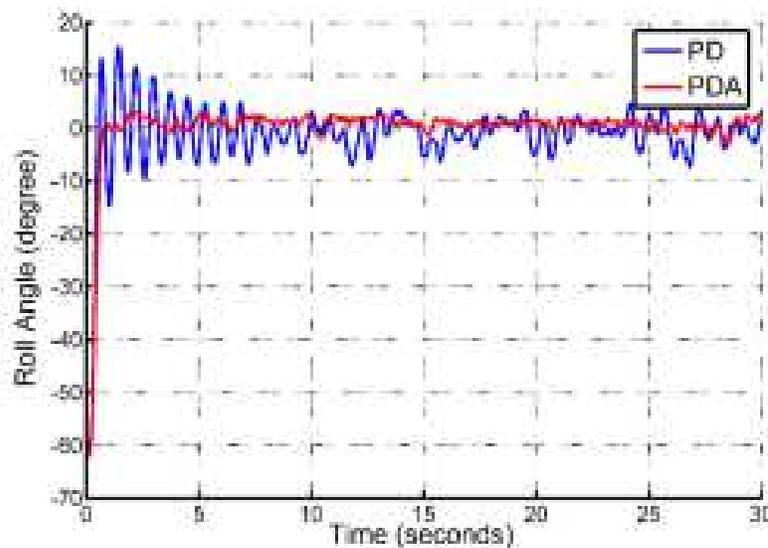


Figura 4.7 Comportamiento del sistema PD y PDA [6].

Mediante la implementación de un sistema de control PID con dos motores la velocidad de respuesta al tiempo en comparación con el sistema que solo cuenta con un motor con hélice muestra mayor inestabilidad al momento de entrar al punto de referencia. En la Figura 6.1.3.4 se observa la respuesta de sistema que tiene por nombre Control de posición de un balancín con Arduino. En comparación con el sistema con dos motores acoplados en cada extremo de la barra se obtiene una respuesta en un menor tiempo.

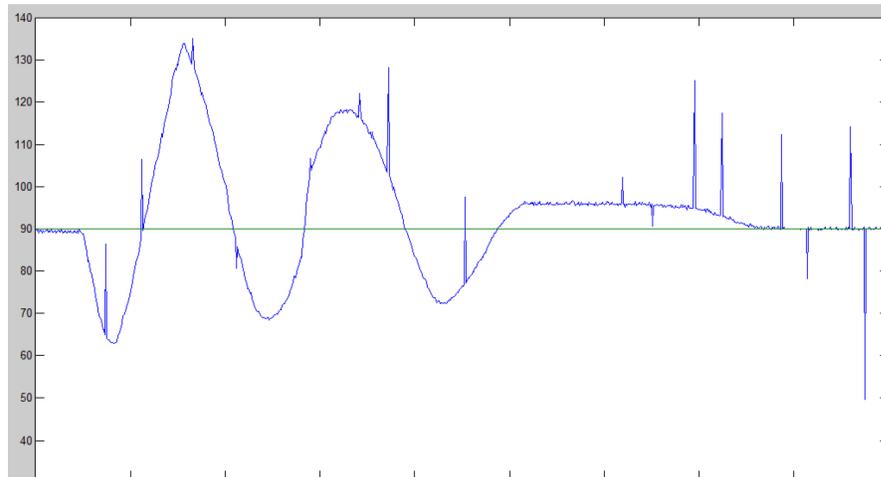


Figura 4.8 Respuesta de un sistema con un solo motor y hélice [1].

De tal manera es posible observa en la Figura 6.1.3.5 la respuesta de un sistema de control PI, donde es posible observar que la respuesta del sistema respecto al tiempo es muy es lento, pero es posible observar que la posición evoluciona linealmente ante cambios en la referencia.

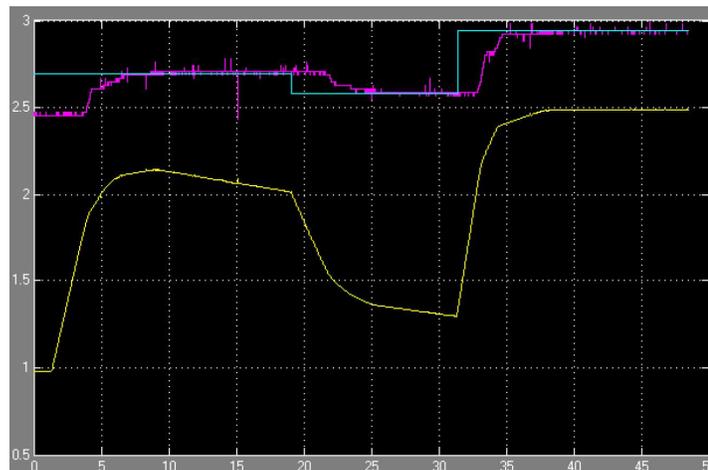


Figura 4.9 Respuesta del sistema con controlador PI.

4.1.14 Preliminares

Se desarrolló un sistema de control para un sistema mecánico nombrado balancín, el cual consiste en un controlador clásico Proporcional Integral y Derivativo (PID).

Por medio del desarrollo de este sistema de control se presenta la dinámica y el sistema de control para un modelo linealizado de medio Quadcopter. La parte de control da lugar a la implementación de una nueva acción de control, que considera la aceleración angular más el controlador de PID y la compara con el controlador de PD-A regular. El controlador PID tiene como objetivo mejorar la respuesta de un sistema que el PD-A normal. Con el fin de mostrar la efectividad de la PID sobre la PD-A, se realizaron estudios teóricos y experimentales basados en un modelo de medio Quadcopter de un grado de libertad. MATLAB/Simulink software se utiliza en la simulación para generar los resultados teóricos.

4.1.15 Sensores

Un sensor es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas. Las variables de instrumentación pueden ser, por ejemplo: intensidad lumínica, temperatura, distancia, aceleración, inclinación, presión, desplazamiento, fuerza, torsión, humedad, movimiento, pH, entre otras [23]. Un sensor que maneja una magnitud eléctrica puede ser una resistencia eléctrica, una capacitancia eléctrica (como en un sensor de humedad), un dispositivo que genera una diferencia de potencial (como en un termopar), entre otros [23].

Un sensor se diferencia de un transductor en que el sensor está siempre en contacto con la variable de instrumentación con lo que puede decirse también que es describirse como un dispositivo que aprovecha una de sus propiedades con el fin de adaptar la señal que mide para que la pueda interpretar otro dispositivo. Por ejemplo, el termómetro de mercurio que aprovecha la propiedad que posee el mercurio de dilatarse o contraerse por la acción de la temperatura. Un sensor también puede decirse que es un dispositivo que convierte una forma de energía en otra [23].

4.1.16 Sensor de posicionamiento angular

Para poder monitorear la posición de la barra mecánica del balancín se eligió un potenciómetro de precisión, ya que genera una respuesta lo más cercano a la linealidad ante un movimiento angular de la caña la cual está acoplada a la barra rígida del balancín. De manera que la resistencia variable utilizada genera una variación de su resistencia en función de la posición angular del balancín de manera que se establece una variación de la resistencia eléctrica que se puede describir mediante una relación matemática simple.

Para cada posición del balancín corresponderá un valor de resistencia $R(\alpha)$, mediante un arreglo que permita generar una variación en voltaje el cual será registrado por las entradas analógicas de un microcontrolador.

El potenciómetro seleccionado tiene un valor nominal de $50\text{ k}\Omega$, si se divide la tensión de alimentación entre el valor de la resistencia, se obtiene la resolución del sensor, que indica la variación de la posición, matemáticamente se puede expresar de la siguiente manera:

$$Res = \frac{V_{cc}}{R} = \frac{5V}{50k\Omega} = \frac{.1V}{K\Omega}$$

Para el rango de tensiones en el que se trabaja esta resolución es buena ya que ante mínimas variaciones de posición tendremos un cambio apreciable en la lectura del sensor [24].



Figura 4.10 Potenciómetro Lineal [24].

4.1.17 Amplificador operacional

El amplificador operacional es un dispositivo electrónico de propósito general, el cual tiene la capacidad de manejar señales desde una frecuencia de 0 Hz, hasta una frecuencia definida por el fabricante; además tiene un intervalo bien definido de trabajo en cuanto a voltaje. Los amplificadores operacionales se caracterizan por tener una entrada diferencial y una ganancia de voltaje alta, generalmente mayor que 105 equivalentes a 100dB [25].

El nombre de Amplificador Operacional proviene de una de sus utilidades básicas, como de realizar operaciones matemáticas en computadores analógicos) [25].

Un Amplificador Operacional ideal se caracteriza por presentar:

1. Resistencia de entrada, (R_{in}), tiende a infinito.
2. Resistencia de salida, (R_{out}), tiende a cero.
3. Ganancia de tensión de lazo abierto, ($Gain$), tiende a infinito
4. Ancho de banda (BW) tiende a infinito.
5. $v_o = 0$ cuando $v_+ = v_-$

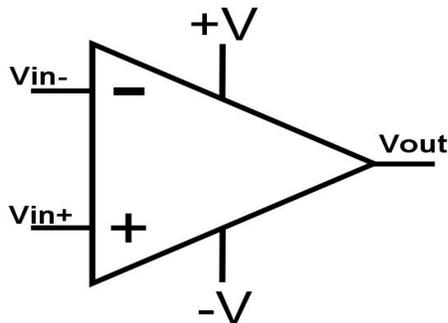


Figura 4.11 Amplificador operacional.

4.1.18 Arduino

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en un microcontrolador BASIC Stamp un entorno de desarrollo diseñado para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios. El hardware consiste en una placa con un microcontrolador Atmel AVR y puertos de entrada/salida. Los microcontroladores más usados son el Atmega 168, Atmega 328, Atmega 1280, ATmega8 por su sencillez y bajo coste que permiten el desarrollo de múltiples diseños. Por otro lado, el software consiste en un entorno de

desarrollo que implementa el lenguaje de programación Processing/Wiring y el cargador de arranque que es ejecutado en la placa [26].

Arduino se puede utilizar para desarrollar objetos interactivos autónomos o puede ser conectado a software tal como Adobe Flash, Processing, Max/MSP, Pure Data). Las placas se pueden ser montadas a mano o ser adquiridas. El entorno de desarrollo integrado libre se puede descargar gratuitamente.

Arduino puede tomar información del entorno a través de sus entradas analógicas y digitales, puede controlar luces, motores y otros actuadores. El microcontrolador en la placa Arduino se programa mediante el lenguaje de programación Arduino (basado en Writing) y el entorno de desarrollo Arduino (basado en Processing). Los proyectos hechos con Arduino pueden ejecutarse sin necesidad de conectar a un computador.

4.1.19 Modulación por ancho de pulso

La modulación por ancho de pulsos (PWM) es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica, ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga. El ciclo de trabajo de una señal periódica es el tiempo de encendido (llamado ancho de pulso) en relación con el periodo de la señal completa [27]. La técnica de PWM tiene varias aplicaciones. Una técnica para el control digital es generar una señal que conmuta entre un estado de apagado y encendido, generando una señal cuadrada. Dicho patrón puede ser utilizada para simular la técnica PWM generada mediante técnicas de sistemas digitales. [27].

En la Figura 4.9, se muestra de forma gráfica el funcionamiento de la técnica PWM, para 25, 50, 75 y 100 % de ciclo de Trabajo.

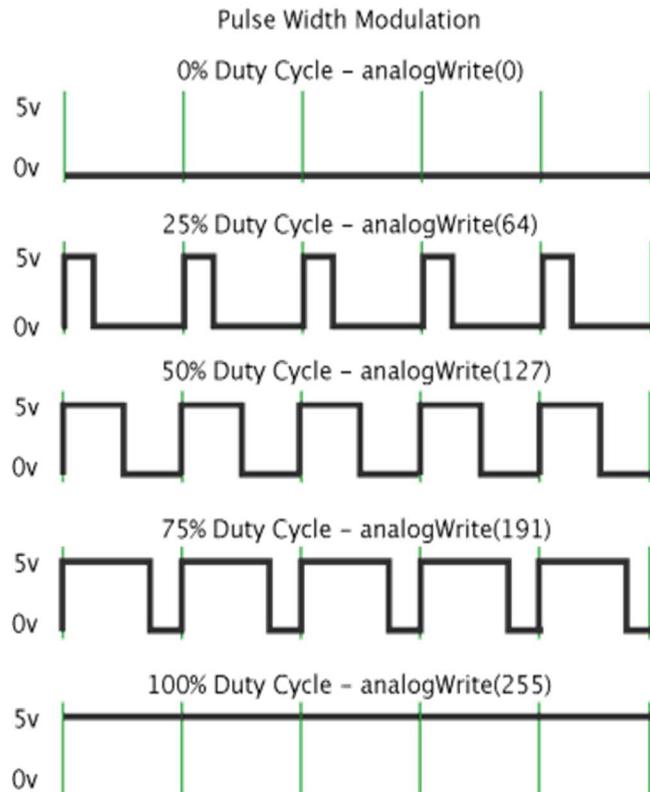


Figura 4.12 Ejemplo del uso de la técnica PWM a diferentes ciclos de trabajo [27].

4.1.20 Motor sin escobillas (Motor brushless)

Los motores brushless son motores eléctricos que consisten de un rotor formado por una serie de imanes permanentes y un estator bobinado. Los imanes permanentes en el rotor es la característica principal de estos motores y por los que se les llama “sin escobillas” o brushless. Al tener un campo magnético constante creado por los imanes, no hay necesidad de un bobinado y escobillas para conducir la corriente al rotor. En la Figura 4.10 se observa el despiece de un motor eléctrico brushless. Cabe destacar que el estator se encuentra en el interior y el rotor que es móvil es la carcasa unida al eje del motor. El estator tiene 3 bobinados independientes que son las 3 fases del motor [28].

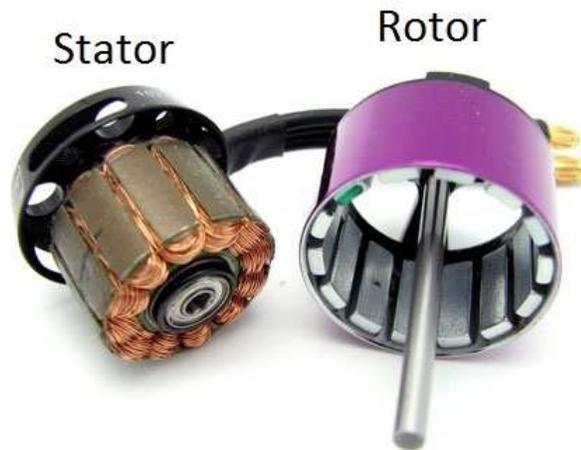


Figura 4.13 Motor brushless [28].

El funcionamiento de estos motores es similar a otros motores eléctricos de imanes permanentes. Al energizar una bobina, esta crea un campo magnético. El rotor que tiene un campo magnético constante, detecta la variación y tiende a alinear el campo creado por el estator y el propio haciendo girar el rotor ya que es la parte móvil del motor. Para lograr que el rotor siga girando, antes de que se alinee por completo la bobina energizada con el rotor, se energiza la bobina que le sigue y a la anterior se la deja de alimentar. Esto provoca que el campo magnético del rotor siga al campo magnético del estator, que va variando en el tiempo, haciendo que el rotor gire [28].

4.1.21 Circuito de mando del motor brushless(ESC)

Para poder hacer girar de manera adecuada un motor del tipo brushless, se requiere de un circuito electrónico que permita gestionar la energía de forma que se generen las señales requeridas y de forma sincronizada para energizar las bobinas que componen al motor. En la presente tesis se hizo uso de un circuito de mando de los motores brushless los cuales tienen una capacidad de corriente máxima de 30 A. En el mismo circuito se tiene integrado un regulador lineal que permite alimentar el motor y brindar las cualidades básicas para que este sea habilitado. Otros circuitos de control en cambio no lo llevan. Para finalizar con el hardware, este circuito de control activa los transistores del puente

en H que lleva integrado, directamente desde el micro controlador. El micro controlador suele ser de tecnología ARM y de la familia ATMEL [28] [29].

En cuanto a software, estos circuitos llevan implementado un control en lazo cerrado de la velocidad del motor brushless sensorless por medio del control de la fuerza contra electromotriz inducida en el bobinado del motor cuando se encuentra en movimiento. No controlan la corriente en lazo cerrado, pero sí detectan si la batería se está agotando para no dañarla. También al conectarse con la emisora la aeronave no tripulada, mandan un pulso al motor para que emita un pitido cuando reciba correctamente la señal al inicio [28].

Es un circuito de control genérico ya que la diferencia básica de este con otros modelos reside en los amperios que permiten conducir. En modelos más costosos se pueden encontrar mejoras en el software como controlar un frenado del motor o incluso frenados regenerativos.

Todos los circuitos se encuentran preparados para recibir una PWM por un pin desde el circuito de control de la velocidad necesaria que debe llevar el motor.



Figura 4.14 Circuito de control del motor brushless [29].

4.1.22 Adaptador I²C para LCD 20x4

Es un bus de comunicaciones serial que utiliza dos líneas para transmitir información: una para los datos y por otra la señal de reloj para la sincronía. Generalmente suelen comunicarse dos circuitos en una misma placa que comparten la misma señal de tierra. En la mayoría de las placas Arduino, SDA (línea de datos) está en el pin analógico 4, y SCL (línea de reloj) está en el pin analógico 5. En Arduino Mega, SDA está en el pin digital 20

y SCL en el 21. Con el protocolo I²C es posible ampliar el número de entradas digitales e incluso comunicar varias placas de Arduino entre sí. Para este trabajo se hace uso de la comunicación I²C para poder desplegar en una pantalla de cristal líquido (LCD) información necesaria para el usuario del sistema. Con el protocolo I²C podemos ampliar nuestro número de entradas digitales e incluso comunicar varios arduinos entre sí. Mediante la utilización de los módulos I²C es posible minimizar el uso de demasiadas conexiones [30].

La plataforma de Arduino ofrece una serie de librerías para la comunicación sobre el protocolo I²C. La librería utilizada Wire.h, permite comunicar la placa Arduino con un LCD de 20x4.

En la Figura 4.12 se muestra un módulo I²C.

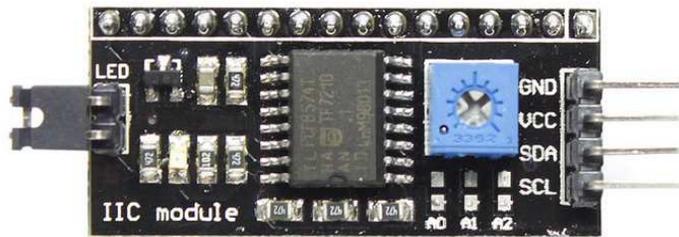


Figura 4.15 Módulo I²C para LCD [30].

4.1.23 Pantalla de Cristal Líquido (LCD)

Una pantalla de Cristal Líquido permite mostrar información en forma gráfica, LCD significa Liquid Crystal Display (Pantalla de cristal líquido). La mayoría de las pantallas LCD vienen unidas a una placa de circuito y poseen pines de entrada/salida de datos [31]. En este trabajo se utiliza para mostrar la posición y velocidad de giro de los motores. En la Figura 4.13 es posible observar una pantalla LCD 20*4.



*Figura 4.16 Pantalla LCD 20*4 [31].*

4.1.24 Comunicación serial

La plataforma Arduino permite establecer una comunicación con la computadora a través del puerto serie. Dicha comunicación es realizada a través de un puerto USB. Se realiza una interfaz entre la comunicación serie y el puerto USB por medio de un convertidor integrado en la placa Arduino. A su vez permite la facilidad de ser reconocido mediante un puerto COM de las computadoras [32].

En una placa de Arduino se utiliza el puerto USB para dos funciones: cargar el programa compilado en la memoria flash y conectar el puerto Serie (UART) predefinido en cada Arduino para comunicarse durante la ejecución del programa. Ambas tareas se pueden realizar sin necesidad del puerto USB, pero dada la versatilidad de su uso y que todos los ordenadores disponen de un puerto USB, se facilita hacer estas dos operaciones.

Las funciones principales del chip UART son de manejar las interrupciones de los dispositivos conectados al puerto serie y de convertir los datos en formato paralelo, transmitidos al bus de sistema, a datos en formato serie, para que puedan ser transmitidos a través de los puertos y viceversa [32].

El UART (Transmisor-Receptor Asíncrono Universal, es el dispositivo que controla los puertos y dispositivos serie) normalmente no genera directamente o recibe las señales externas entre los diferentes módulos del equipo. Usualmente se usan dispositivos de interfaz separados para convertir las señales de nivel lógico del UART hacia y desde los niveles de señalización externos [32].

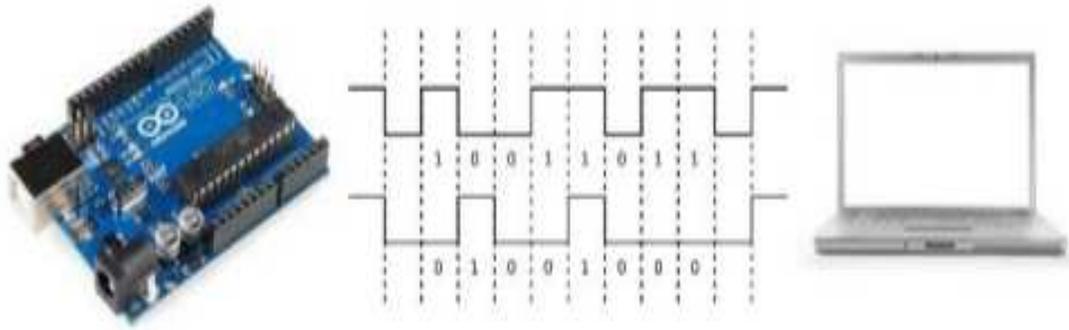


Figura 4.17 Comunicación serial Arduino PC [32].

4.1.25 MATLAB

MATLAB (abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio mediante matrices") es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux [33].

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes); y las de Simulink con los paquetes de bloques (blocksets) [33].

Es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo. En los últimos años ha aumentado el número de prestaciones, como la de programar directamente procesadores digitales de señal o crear código VHDL (es un lenguaje definido por el IEEE, VHDL es el acrónimo que representa la combinación de VHSIC y HDL, donde VHSIC es el acrónimo de Very High Speed Integrated Circuit y HDL es a su vez el acrónimo de Hardware Description Language.) [33].

Millones de ingenieros y científicos utilizan MATLAB® para analizar y diseñar los sistemas y productos que transforman nuestro mundo. MATLAB está presente en sistemas de seguridad activa de automóviles, naves espaciales interplanetarias, dispositivos de

monitorización de la salud, redes eléctricas inteligentes y redes móviles LTE. Se utiliza para aprendizaje automático, procesamiento de señales, procesamiento de imágenes, visión artificial, comunicaciones, finanzas computacionales, diseño de control, robótica y muchos otros campos [33] [34].

4.1.25.1 Simulink

Simulink es una herramienta de Matlab que funciona mediante un entorno de programación visual, las funciones están representadas por bloques, lo que hace muy sencillo su utilización sin necesidad de emplear lenguajes complejos de programación. Es un entorno de programación de más alto nivel de abstracción que el lenguaje que interpreta Matlab (archivos con extensión .m). Simulink genera archivos con extensión. mdl (de "model"). Al ejecutar un modelo implementado en Simulink se genera un código en C que el ordenador reconoce y ejecuta. Admite el diseño y la simulación a nivel de sistema, la generación automática de código y la prueba y verificación continua de los sistemas embebidos. Mediante Simulink se puede construir y simular modelos de sistemas físicos y sistemas de control mediante diagramas de bloques. El comportamiento de dichos sistemas se define mediante funciones de transferencia, operaciones matemáticas, elementos de Matlab y señales predefinidas de todo tipo [35].

Tiene una conexión directa con Matlab, pudiendo exportar los resultados obtenidos en Simulink para hacer análisis más exhaustivos y poder obtener nuevos resultados. También algunos bloques nos dan la posibilidad de incorporar algoritmos propios de Matlab [35].

Simulink ofrece la posibilidad de conectar el modelo con hardware para comprobar en tiempo real y de una manera física el funcionamiento de este.

En Simulink es posible crear y simular modelos mecánicos, eléctricos, electrónicos, aeronáuticos, entre otros. Gracias a la gran variedad de bloques (blocksets) de los que dispone.

La plataforma de MATLAB está optimizada para resolver problemas de ingeniería y científicos. El lenguaje de MATLAB, basado en matrices, es la forma más natural del mundo para expresar las matemáticas computacionales. Los gráficos integrados facilitan

la visualización de los datos y la obtención de información a partir de ellos. Una vasta librería de toolboxes preinstaladas le permiten empezar a trabajar inmediatamente con algoritmos esenciales para su dominio. El entorno de escritorio invita a experimentar, explorar y descubrir. Todas estas herramientas y prestaciones de MATLAB están probadas y diseñadas rigurosamente para trabajar juntas [35].



Figura 4.18 MATLAB [33].

4.1.26 Librería Servo.h para Arduino

Esta biblioteca permite a una placa Arduino controlar servomotores por medio de la modulación por ancho de pulso (PWM). Los servos integran engranajes y un eje que puede ser controlado con precisión. Los servos estándar permiten al eje ser posicionado en varios ángulos, por lo general entre 0 y 180 grados. [36]. En este trabajo el uso de esta librería permitirá regular la velocidad de giro de los motores brushless por medio de la técnica PWM que requieren los circuitos de mando de los motores brushless.

4.1.27 Librería Wire.h para Arduino

Esta biblioteca permite comunicar dispositivos mediante el protocolo I²C. El protocolo I²C, define las reglas de cómo podemos conectar diferentes dispositivos entre sí, desarrollado por Philips en la década de los 80/90, convirtiéndose en la actualidad como un estándar. I²C crea un bus de comunicación entre los diferentes dispositivos en serie, esto nos permite conectar hasta 1000 dispositivos uno detrás de otro. La comunicación siempre se realizará entre dos dispositivos, uno actuara de maestro, este es el que transmitirá la señal para sincronizar la transferencia de datos, y el otro de esclavo. El que hace de maestro, no tiene por qué hacer esta función siempre, puede ir pasándose de uno a otro, aunque no todos los periféricos tienen esta funcionalidad, están diseñados para ser siempre esclavos. [37].

El bus I2C consta de 3 líneas, SDA (datos), SCL (reloj) y GND (masa).

Como referencia la siguiente tabla muestra dónde pines que se encuentran en diversas placas Arduino.

Tablero	I2C pines
Uno, Ethernet	A4(SDA), A5(SCL)
MEGA2560	20(SDA), 21(SCL)
Leonardo	2(SDA),3(SCL)
Due	20(SDA),21(SCL), SDA1, SCL1

Tabla 4.1 Tabla Pines SDA y SCL [37].

En el presente proyecto se hace uso de ésta librería para poder comunicar el adaptador I²C con la computadora a través de la placa de Arduino, para enviar y desplegar datos en la pantalla de Cristal Líquido.

4.1.28 Teoría de Lógica Difusa

Las computadoras básicamente manejan datos precisos a través de cadenas de unos (1) y ceros (0) y proposiciones que son ciertas y falsas (lenguaje máquina). El cerebro humano puede razonar con información que involucra incertidumbre o juicios de valor como: “es un poquito alto” o “está muy caliente” esto asociado a un sentido común que les permite razonar en un mundo donde las cosas son parcialmente ciertas. 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 lo verdadero. Los sistemas difusos permiten agregar un grado de humanidad a los sistemas, mediante consideraciones del lenguaje natural ya que cuando se traduce el lenguaje humano al contexto de la lógica clásica se pierde el sentido del significado, pérdida que puede ser importante para diseñar un sistema experto, el cual emula la función de un ser humano especializado en determinada área. La lógica difusa puede controlar o describir el sistema usando reglas de sentido común que se refieren a cantidades indefinidas [11] [13]. Los sistemas difusos frecuentemente tienen reglas tomadas de expertos, pero cuando no hay experto los sistemas difusos adaptivos aprenden las reglas observando cómo la gente manipula sistemas reales [13].

La lógica difusa hoy en día es común y se encuentra en diferentes sectores de la tecnología, tanto en la electrónica como el control, las matemáticas, la robótica, entre otras. El objetivo principal de la lógica difusa es crear un sistema basado en el comportamiento y pensamiento humanos. Esto se logra gracias al planteamiento de un modelo en cualquier contexto y traducirlo a lenguaje humano; el éxito de la lógica difusa se basa en la experiencia. El sistema toma el banco de conocimiento del experto y con él crea sus reglas para desarrollar una propuesta [11].

Tres son las etapas para obtener un resultado deseado mediante lógica difusa. La primera etapa se basa en un proceso donde las variables tienen un grado de incertidumbre lingüístico. Por lo tanto, el rango de valores (universo de discurso) de cada variable puede clasificarse por conjuntos difusos por ejemplo baja, media, alta. Cuando se miden las variables, los valores pasan a un proceso de “FUSIFICACIÓN” que consiste en pasar dichos valores a un rango de pertenencia entre cero (0) y uno (1). Se busca determinar en qué grado el valor que se está adquiriendo pertenece a un conjunto difuso. Los conjuntos difusos son caracterizados mediante funciones de membresía, las cuales están sintonizadas al punto de operación adecuado para el funcionamiento del sistema.

En la segunda etapa se proponen reglas lingüísticas de “INFERENCIA” que servirán de guía para que el sistema se comporte de manera más adecuada, idónea o deseada según el modelo de referencia o los objetivos del usuario. El grado de pertenencia de cada una de las variables se evalúa en un conjunto de reglas de inferencia. Dichas reglas de inferencia fueron determinadas con ayuda de un experto. El conjunto de reglas de inferencia determina una consecuencia, es decir, asigna un grado de pertenencia a un conjunto difuso que caracteriza a las salidas. Una vez obtenidas las consecuencias, la tercera etapa es un proceso para determinar los valores óptimos de salida, conocido como “DEFUSIFICACIÓN” y que consiste en pasar el grado de pertenencia, proveniente de la consecuencia de la regla de inferencia, a un valor nítido o real. Para hacer esto, el paso previo es sintonizar funciones de membresía de cada una de las salidas, con el fin de obtener un valor cuantificable [11] [9]. La Figura 4.16 muestra el diagrama de un controlador difuso además del flujo de los datos a través de los procesos aplicados mediante lógica difusa.

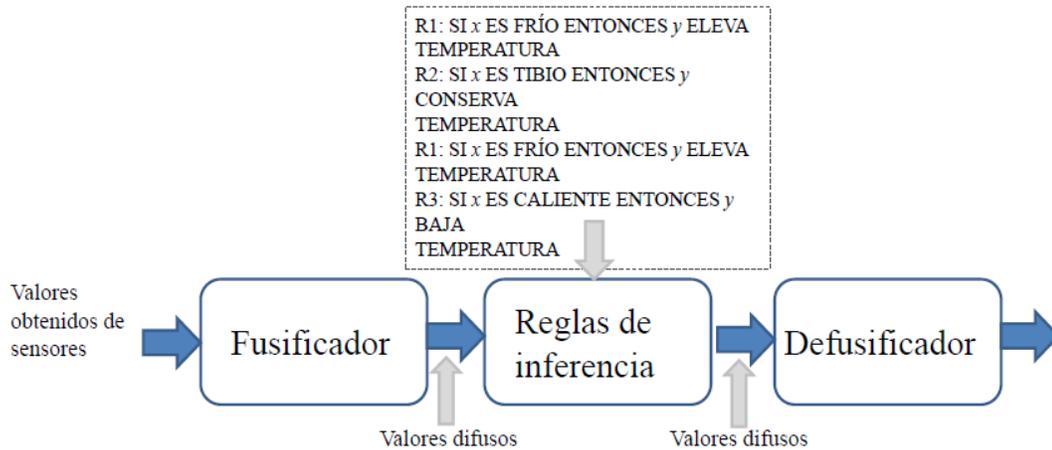


Figura 4.19 Diagrama general de un controlador difuso [11].

5 METODOLOGÍA

En este capítulo se describe el procedimiento que se llevó a cabo para alcanzar los resultados de la investigación. Su propósito es garantizar la reproducibilidad de dichos resultados, para que las pruebas, experimentos, cálculos, sean repetidos por cualquier persona con los conocimientos técnicos esenciales de la materia.

5.1 Requerimientos o especificaciones

El Software que se empleará como herramienta en la investigación será MATLAB/SIMULIK® utilizando una licencia de estudiante. Además de una computadora con los siguientes requisitos:

- Procesador (de 4 núcleos o mayor)

- Memoria RAM de 8GB

Además de una computadora se requiere de:

- Una tarjeta electrónica de la plataforma Arduino (cualquier modelo).
- 2 Motores de tipo sin escobillas o motores brushless.
- 2 manejadores de motores sin escobillas.
- Fuente de 12 V DC
- Software de aplicación específica, específicamente MATLAB/SIMULIK®.
- 1 Sensor posición angular (potenciómetro de precisión).

La plataforma del software MATLAB/SIMULIK®, ofrece una opción viable para el desarrollo y la programación gráfica del algoritmo propuesto, debido a que cuenta con una amplia barra de herramientas de control y varias funciones para los algoritmos de control.

5.2 Diseño e implementación

5.2.1 Comparación de potenciómetro lineal y convencional.

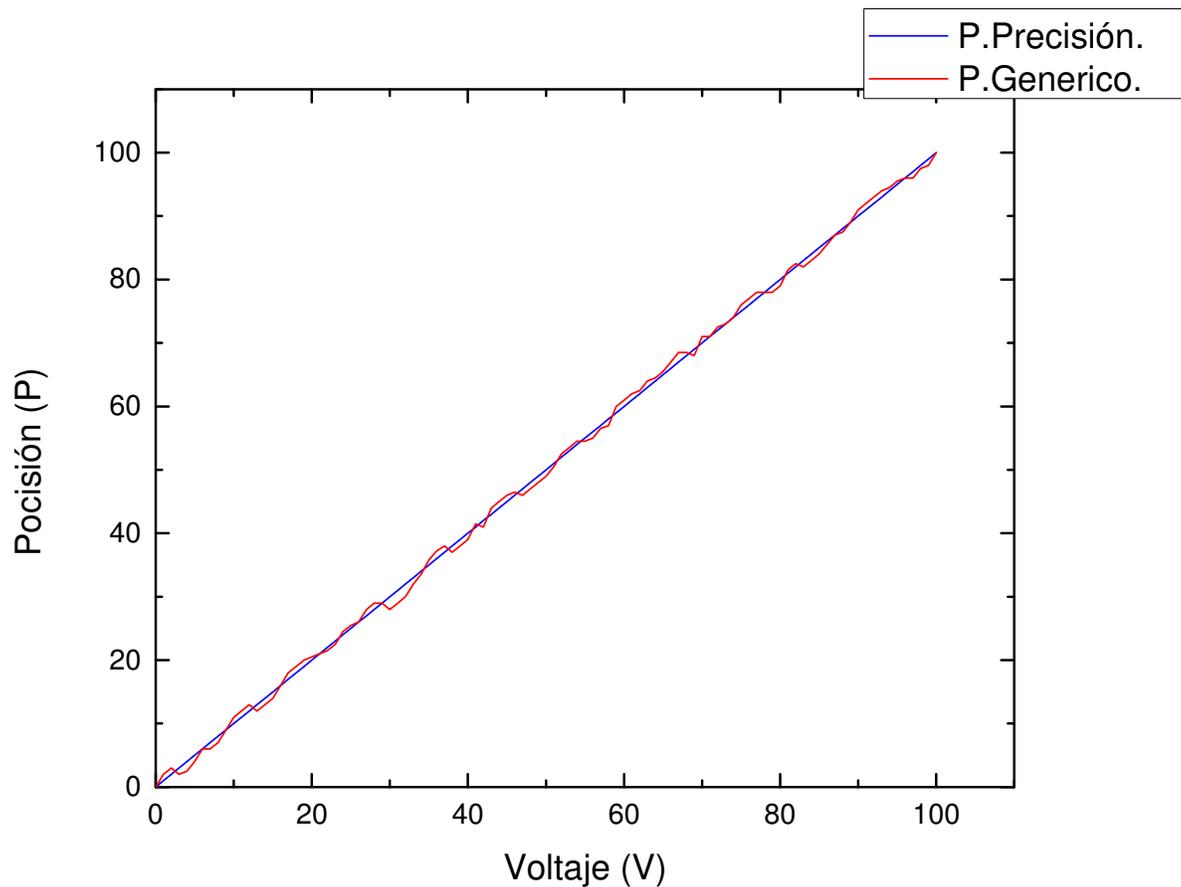
Mediante la búsqueda de un dispositivo que permita determinar la posición angular permitió el cual su función seria la medida de la posición angular se realizaron alguna serie de pruebas con un potenciómetro las pruebas con un potenciómetro convencional, el resultado mostraba que, al establecer un movimiento, se generaba una respuesta no lineal, es decir, a un movimiento de la posición del sensor, la resistencia no se incrementaba de forma constante. Por lo que se buscó realizar las mismas pruebas con una resistencia variable (potenciómetro) de precisión la respuesta de cambio de resistencia con respecto a la posición era con un incremento gradual y correspondiente al movimiento. este generaba una señal no lineal, de tal manera que era necesario la utilización de un potenciómetro lineal el cual tiene una propiedad de generar una señal lineal respecto al movimiento. En la Figura 5.1 se muestra la respuesta del sensor de precisión al generar un movimiento ascendente, mientras que la respuesta de un potenciómetro convencional; se muestra que, ante un cambio de la posición, la respuesta es ascendente, pero en intervalos

reducidos el aumento no es totalmente lineal lo cual podría introducir problemas para establecer con certidumbre la posición de la barra mecánica del balancín.

Figura 5.1 Comparación de respuesta de un potenciómetro de Precisión y un Genérico

5.2.2 Circuito de acoplamiento para señal de posicionamiento angular

De acuerdo a la configuración del circuito utilizado para la medición de la posición angular mediante el potenciómetro se tiene que el intervalo de voltaje proporcionado por el circuito se encuentra entre 0 y 1.25V. Por lo que se requiere de un circuito acondicionador de señal que permita establecer una amplificación de la señal para que el



voltaje se encuentre en un intervalo de voltaje entre 0 y 5V.

Un amplificador no inversor recibe ese nombre debido a que el voltaje de salida (V_{out}) tiene como resultado el valor amplificado del voltaje de entrada (V_{in}) en base a la siguiente fórmula:

$$V_{out} = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) V_{in} \quad (6)$$

Donde R_2 tiene un valor de $30K\Omega$ y R_1 un valor de $10K\Omega$ y $V_{in}=1.25v$, sustituyendo en la fórmula:

$$V_{out} = \left(\frac{30K\Omega}{10K\Omega} + 1 \right) 1.25v \quad (7)$$

$$V_{out} = 5v \quad (8)$$

Y obtener la ganancia se obtiene con la siguiente formula:

$$Ganancia = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \quad (9)$$

Sustituyendo los valores nos da una ganancia de:

$$Ganancia = 4 \quad (10)$$

Donde su ganancia tiene un valor de 4. Mediante la Figura 5.2 se puede observar el diseño del circuito el cual fue implementado para el sistema de control.

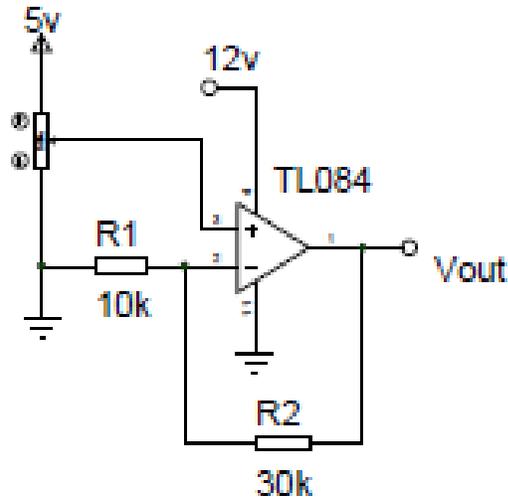


Figura 5.2 Circuito de acondicionamiento del sensor de posición angular.

5.2.3 Diagrama a bloques de sistema eléctrico

El diagrama a bloques de la Figura 5.4, es una representación gráfica del funcionamiento interno del sistema electrónico, donde se aprecian los componentes electrónicos del sistema.

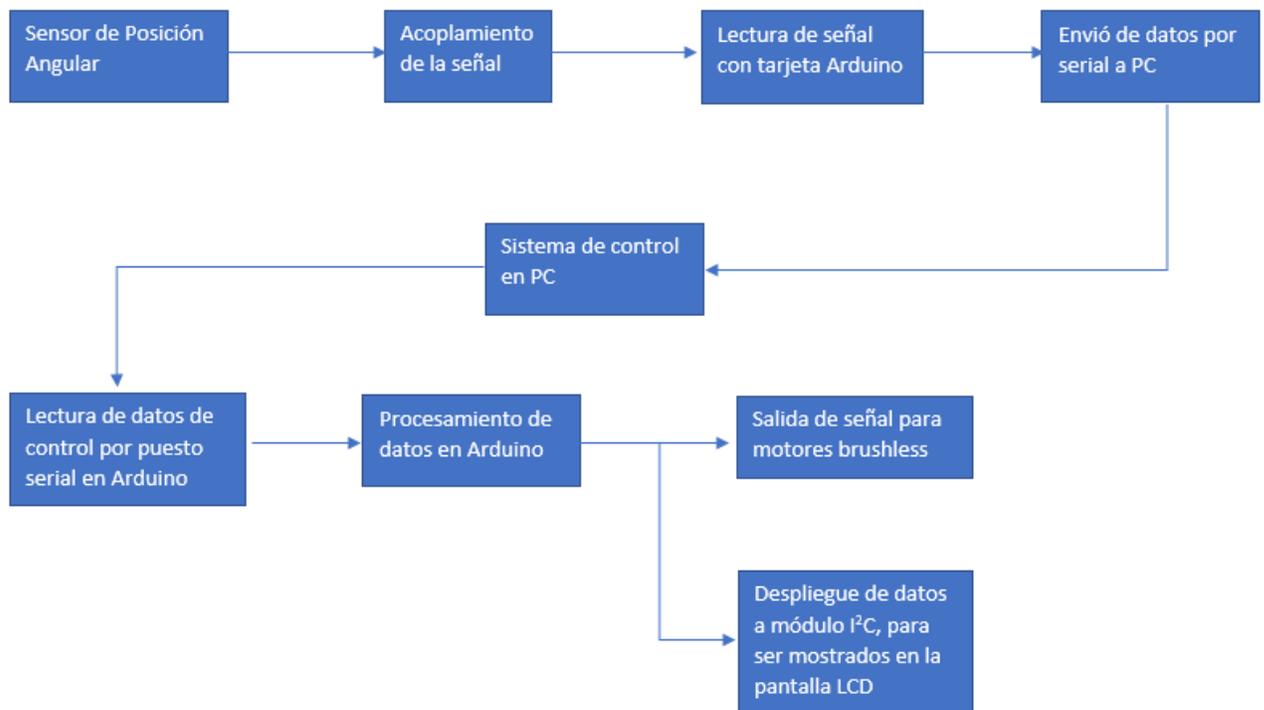


Figura 5.3 Diagrama a bloques del sistema eléctrico.

En la Figura 5.4 se observa que el sensor de posición angular genera la señal de entrada al sistema y mediante el amplificador descrito anteriormente, permite acondicionar la señal para que se tenga un intervalo de trabajo entre 0 y 5V, los cuales son adquiridos mediante la tarjeta Arduino a través de un Convertidor de Analógico a Digital de 8 bits de resolución. Los datos generados por el Arduino se envían a la computadora que por medio del Software de Matlab se hace el procesamiento de los datos y genera una señal de comandos que son enviados al Arduino y a su vez genera una señal de salida para los circuitos de comando de los motores brushless. Además, se generan los datos necesarios para poder visualizar en la pantalla LCD el resultado del monitoreo de la posición angular del brazo mecánico del balancín y el porcentaje de giro de los motores.

5.2.3.1 Conexión electrónica de conexión de sensor de posición angular con Arduino.

Para la adquisición de los datos sobre la posición del sensor de posicionamiento angular, se conecta la salida del amplificador no inversor a una entrada de la placa Arduino, específicamente a la entrada analógica de 0 a 5V lo cual permite enviar los datos mediante el puerto serial. La conexión se realiza como se muestra en la Figura 5.5.

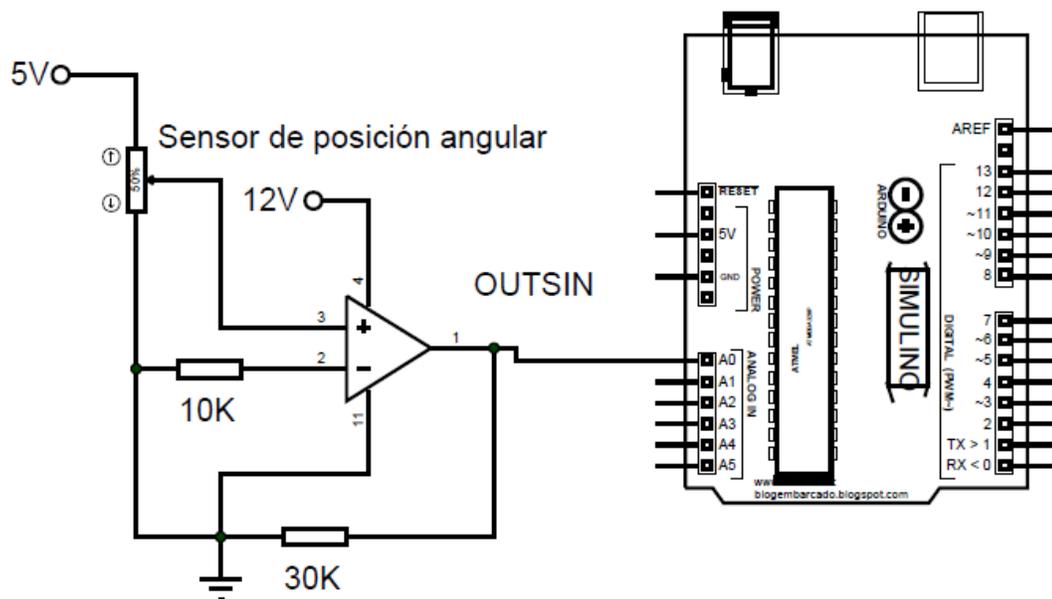


Figura 5.4 Diagrama de conexión de sensor de posición angular con Arduino.

5.2.3.2 Conexión electrónica del Arduino a motores Brushless

Para generar la salida hacia los motores brushless, es necesario la obtención de una de una señal de control emitida por el microcontrolador, dicha señal la cual se envía al Arduino de regreso mediante el puerto serial en donde se transforma a una señal del tipo PWM, la cual es procesada por los circuitos de comando de los motores brushless (ESC), y permiten establecer un control de la velocidad de los mismos. En la Figura 5.6. se muestra el diagrama de conexión iniciando desde el Arduino hacia los circuitos de comando de los motores brushless. La señal del PWM requiere una frecuencia de 50 Hz, con una amplitud del voltaje de 5V.

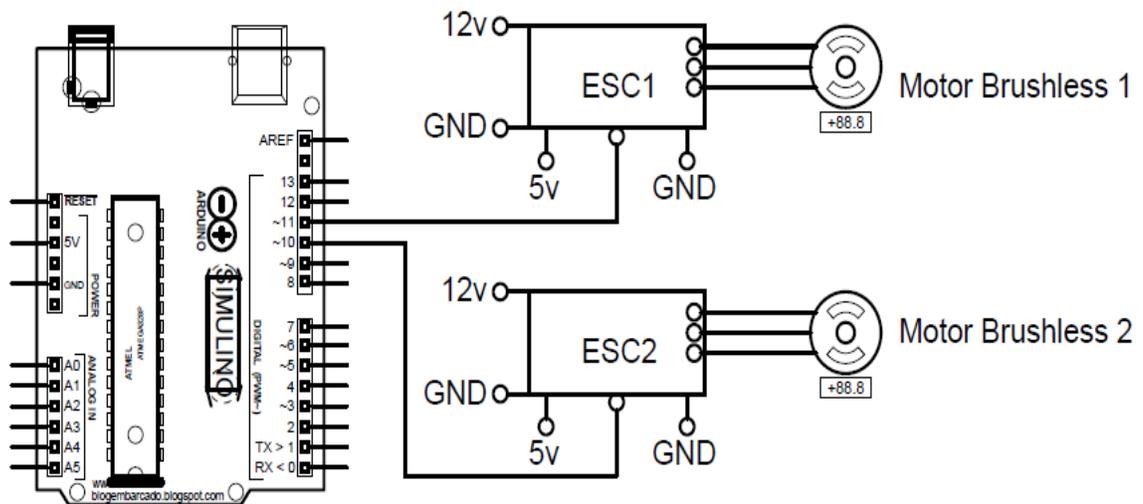


Figura 5.5 Conexión electrónica de Arduino con motores Brushless.

5.2.3.3 Conexión electrónica de Arduino con módulo I²C y pantalla LCD

Para el uso del módulo I²C, también conocido como, IIC o I²C, y también, como TWI (Two Wire Interface, o interface de 2 hilos) el cual requiere de la alimentación y solamente dos líneas, la de datos (SDA) y la de reloj (SCL), conectados como se muestra en la Figura 5.7.

En el diagrama electrónico de la Figura 5.8 se observa que se realizó un sistema completo con el cual es representativo al sistema a bloques del sistema electrónico, pudiendo observar que es el conjunto entre la conexión de la adquisición del sensor de posición angular, la conexión de los motores brushless con el microcontrolador y las salidas hacia la pantalla LCD.

Esta expansión de entrada / salida (E / S) de 8 bits para el bus bidireccional de dos líneas (I2C) está diseñado para una operación VCC de 2,5 V a 6 V.

El dispositivo PCF8574A proporciona expansión de E / S remotas de uso general para la mayoría de las familias de microcontroladores a través de la interfaz I2C [señal de reloj (SCL), datos en serie (SDA)].

El dispositivo cuenta con un puerto de E / S cuasi bidireccional de 8 bits (P0-P7), que incluye salidas bloqueadas con capacidad de alta corriente de accionamiento para impulsar directamente los LED. Cada E / S puede utilizarse como una entrada o salida sin el uso de una señal de control de dirección de datos. Al encender, las E / S son altas. En este modo, sólo está activa una fuente de corriente para VCC.

5.2.4.1 Diagrama Electrónico del sistema completo

En el diagrama de la Figura 5.8 se observa que el conjunto entre la conexión de la adquisición del sensor de posición angular, el cual es el encargado de mostrar la adquirir la posición angular del sistema, así mismo es posible observar que se cuenta con un circuito de acoplamiento de la señal, el circuito electrónico cuenta con la conexión de las salidas de la señal del microcontrolador a los circuitos de control de los motores brushless, contando con las conexiones del microcontrolador al módulo I²C de la pantalla LCD, con lo cual es posible visualizar la velocidad de giro de los motores y la posición en la que se encuentra el sensor.

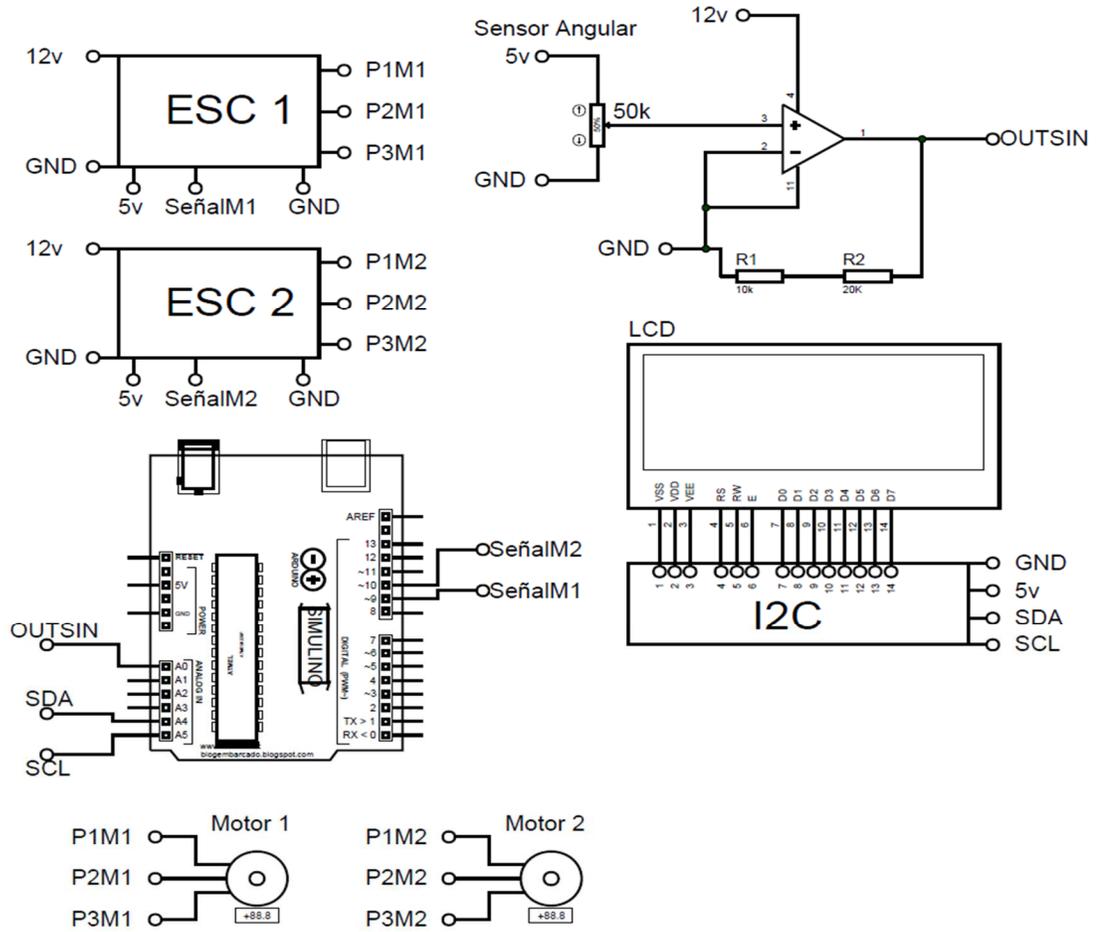


Figura 5.8 Circuito electrónico de sistema de control.

5.2.5 Diagrama de flujo de la programación en Arduino

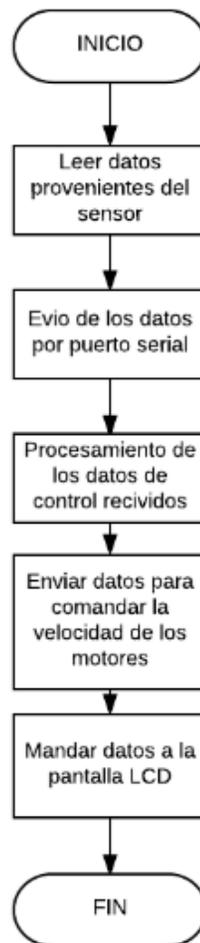


Figura 5.9 Diagrama de flujo del proceso que realiza la tarjeta Arduino.

Por medio del diagrama de flujo mostrado en la Figura 5.9, es posible modelar la programación que se realizó en la tarjeta electrónica Arduino, el cual realizara la lectura de una señal analógica proporcionada por el sensor de posicionamiento angular enseguida los datos de la señal serán enviados por el puerto serial, enseguida es necesario procesar los datos recibidos por el puerto serial para posteriormente convertirlos a una señal de PWM, dichas señales serán las que regulen la velocidad de los motores brushless, así mismo se mostrara en una posición en la que se encuentra el sensor angular como la velocidad de giro de los motores brushless en una pantalla LCD.

5.2.6 Diseño del sistema mecánico

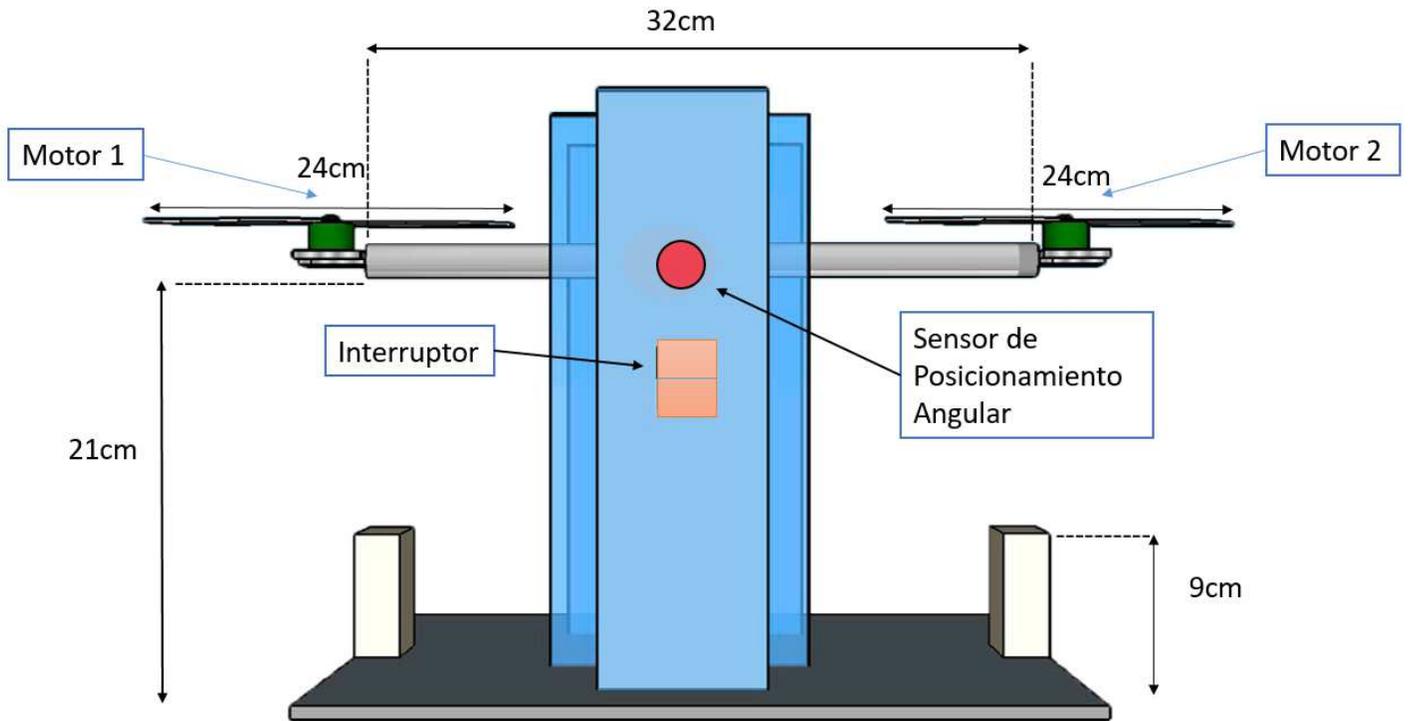


Figura 5.10 Diseño del sistema mecánico.

En la Figura 5.2.5.1 se puede observar la estructura del sistema mecánico que está conformado por dos motores de tipo bushless con una hélice de 24 cm de largo, dichos motores están acoplados a una barra de 32 cm de largo. El sistema tiene incorporado un sensor de posicionamiento angular, encargado de realizar el sensado de la posición en la que se encuentra la barra de 32 cm, así mismo el sistema cuenta con dos limitadores mecánicos de posición ubicados en cada extremo de la barra, con lo cual se evita que las hélices colisionen con la base.

5.2.7 Modelo matemático

Para establecer el modelo matemático del sistema se requiere tener conocimiento de la dinámica del mismo. Se puede modelar como 2 barras ancladas, una de ellas totalmente fija y otra con un grado de libertad que realiza un movimiento rotacional. El centro de rotación es el punto donde se anclan ambas barras.

5.2.7.1 Estudio del movimiento

El movimiento que realiza la barra móvil es el de rotación de un cuerpo rígido alrededor de un eje fijo. Debido que la aceleración del motor dependerá de la posición angular en la que se encuentre la barra.

Con lo cual, el torque relaciona la fuerza ejercida, con su distancia y dirección al eje de giro. Su fórmula es:

$$\tau = r * F$$

Donde “r” es el vector de posición de la fuerza aplicada, que va desde el eje de giro hasta el punto de aplicación de esta.

“F” es la fuerza aplica. Como se ve es un producto vectorial por lo tanto dependerá del ángulo de aplicación de la fuerza.

El torque está relacionado con el momento de inercia. Así mismo es necesario conocer los movimientos rotacionales, ya que todo elemento que gira en torno a un eje posee momento de inercia. La fórmula que la relación es:

$$\sum \tau = I \alpha$$

Donde α es la aceleración angular del cuerpo.

5.2.8 Obtención de la función de transferencia

La función de transferencia de un sistema se define como la transformada de Laplace de la variable de salida y la transformada de Laplace de la variable de entrada, suponiendo condiciones iniciales cero [38].

Para obtener la función de transferencia se ingresa una función escalón y se observa la respuesta del sistema. Como se muestra en el Figura 5.11, en condiciones ideales el sistema debería seguir de forma idéntica a la función escalón, pero las condiciones reales generan que el sistema no se comporte de forma diferente.

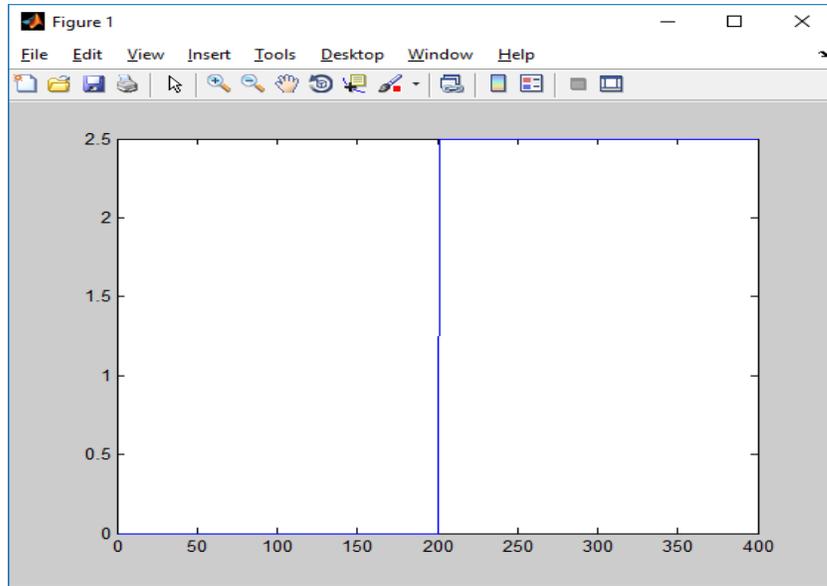


Figura 5.11 Función escalón ingresada.

Para obtener la función de transferencia mediante el método de Ziegler – Nichols, se aplica una señal escalón al sistema con una amplitud de 2.5. El resultado que se obtiene se muestra en la Figura 5.12.

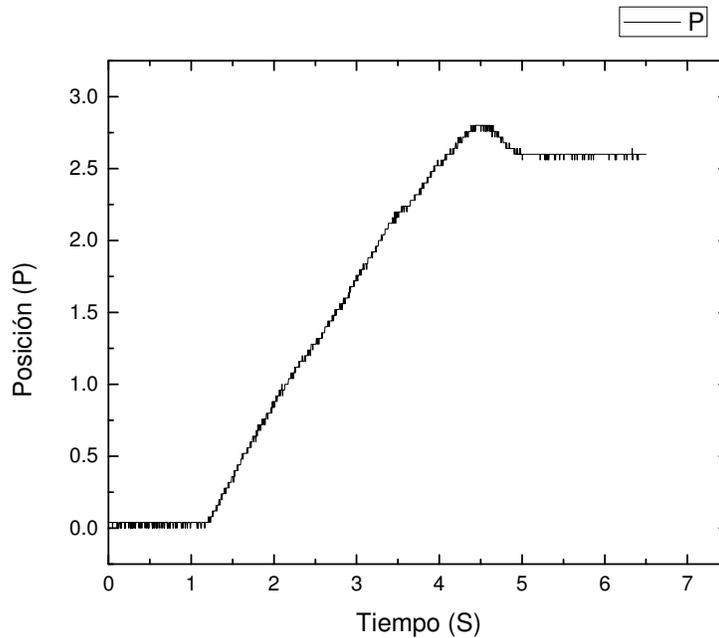


Figura 5.12 Respuesta del sistema a señal escalón.

En forma genérica se representa de la siguiente forma:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_1 s + a_0}{s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0} \quad (11)$$

En sistemas reales o físicamente realizables $m \leq n$. El polinomio del denominador igualado a cero representa la ecuación característica que se utiliza ampliamente en el análisis de la estabilidad del sistema. Señal graficada en Matlab para la obtención de la función de transferencia.

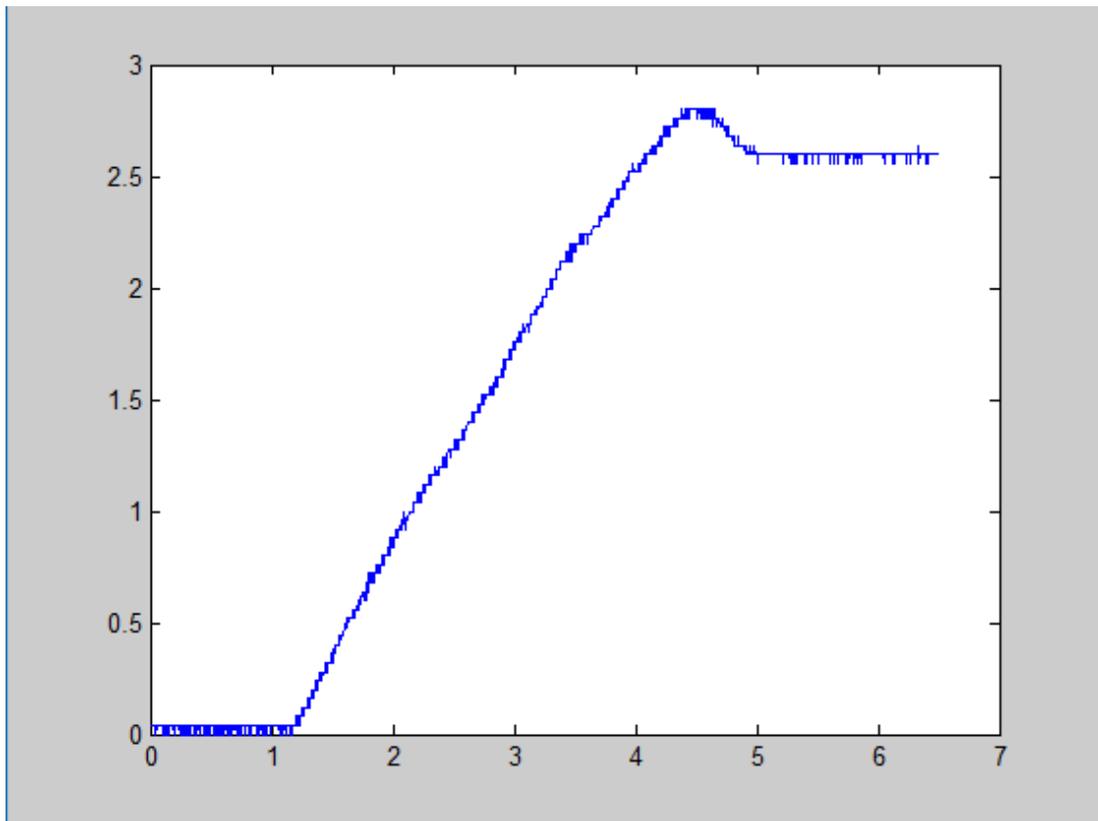


Figura 5.13 Señal graficada en MatLab.

para la obtención de la función de transferencia del sistema se realizó la lectura del comportamiento del sensor con un entrada escalos de 2.5V, con lo cual MATLAB, es de gran utilidad pudiendo graficar el comportamiento, y por medio de la herramienta del software “ident” se ingresaron los parámetros del comportamiento de la señal generando la función de transferencia.

Una función de transferencia Mediante la obtención de la función de transferencia en Matlab se obtiene la siguiente función:

$$\text{Función de Transferencia} = \frac{6}{s^2 + 2.5s + 2.52} \quad (12)$$

Con la función obtenida es posible obtener una representación compacta de un sistema lineal como cociente de polinomios en s . Así mismo permite predecir la forma de las señales sin necesidad de resolver la ecuación diferencial, con lo cual se tiene una interpretación inmediata en la frecuencia: $s = j\omega$

Al procesar los datos obtenidos de la señal escalón para obtener la función de transferencia, la cual es un modelo matemático que a través de un cociente relaciona la respuesta de un sistema (modelada) con una señal de entrada o excitación (también modelada). En la teoría de control, a menudo se usan las funciones de transferencia para caracterizar las relaciones de entrada y salida de componentes o de sistemas que se describen mediante ecuaciones diferenciales lineales e invariantes en el tiempo.

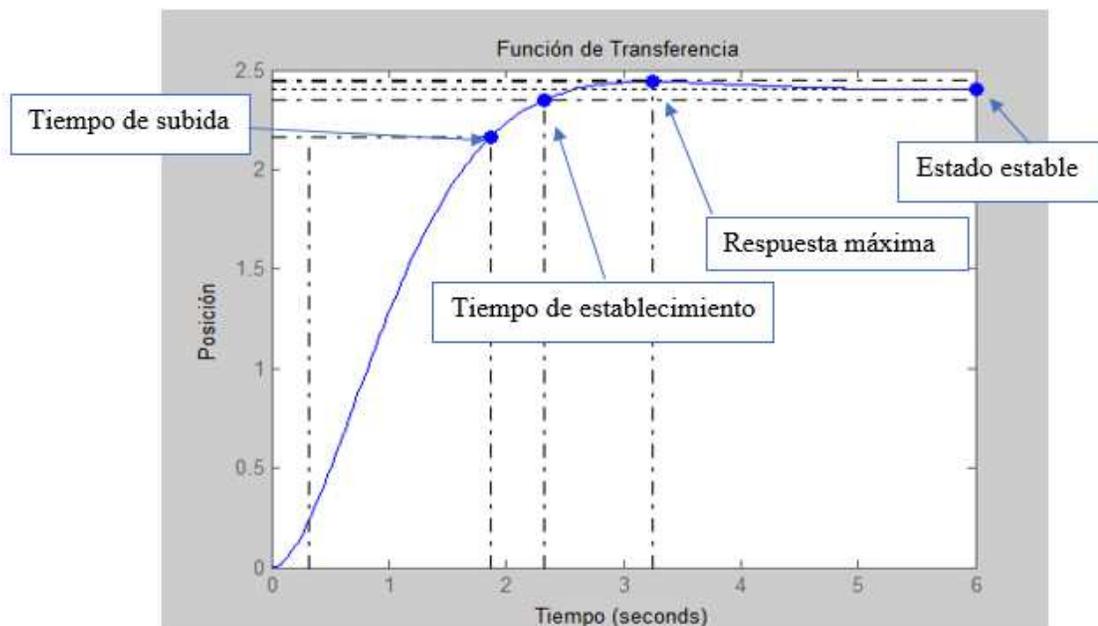


Figura 5.14 Función de transferencia obtenida.

5.2.9 Sintonización

- Los controladores PID son ampliamente usados en los sistemas de control industrial.
- Se aplican a la mayoría de los sistemas de control. Pero se aprecia más su utilidad cuando el modelo de la planta a controlar no se conoce y los métodos analíticos no pueden ser empleados.
- El controlador PID recibe una señal de entrada (generalmente es el error, $e(t)$) y proporciona una salida (acción de control, $u(t)$), mostrando en la siguiente ecuación.

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_{-\infty}^t e(t)dt + \tau_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (13)$$

Entonces, la función de transferencia del controlador PID es:

$$G_c(s) = K_p(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s) \quad (14)$$

Donde K_p es la ganancia proporcional, τ_i el tiempo integral y τ_d es el tiempo derivativo.

El esquema habitual de uso del controlador PID es:

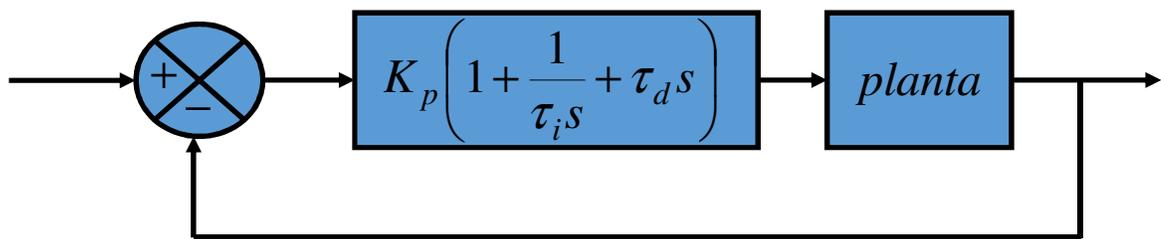


Figura 5.15 Control PID de una planta [3].

Primer método de sintonización. Se obtiene experimentalmente la respuesta de la planta a una entrada escalón y si la respuesta no tiene oscilaciones y además posee un retardo tal que se forma una “S”, puede obtenerse los parámetros del controlador PID utilizando el primer método. En la Figura 4.2 se observa la respuesta en forma de “S”.

Esta respuesta se caracteriza con el tiempo de atraso L y la constante de tiempo T . Y se puede aproximar por un sistema de primero orden con atraso.

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (15)$$

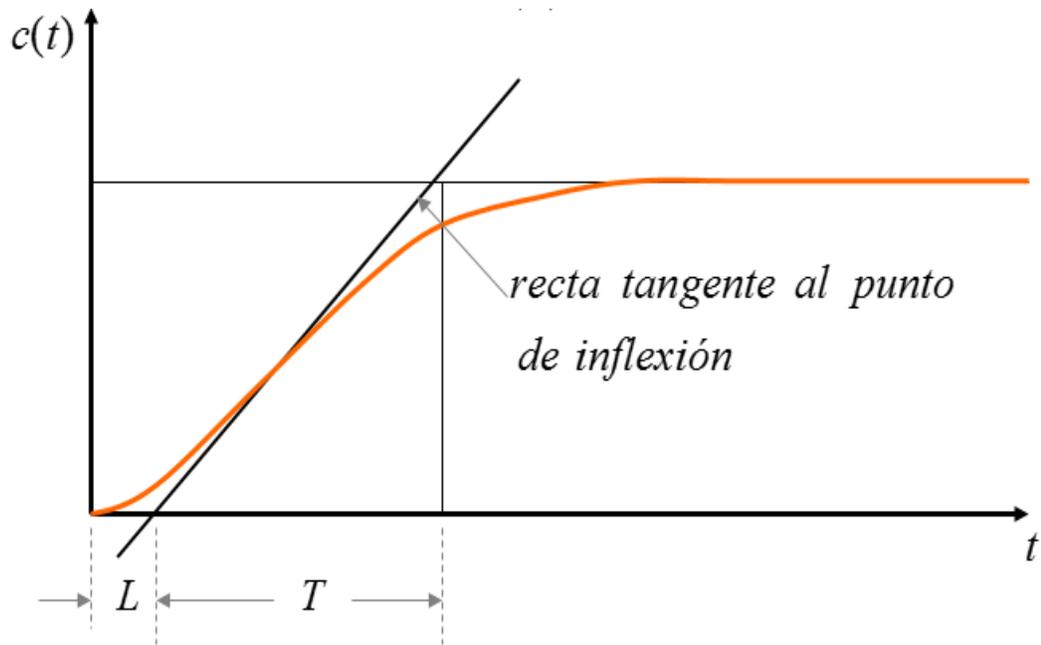


Figura 5.16 Curva experimental en forma de “S” con recta de primer orden.

Para conocer los T y L , es necesario aplicar una recta tangente respecto al punto de inflexión de la función de transferencia, de tal manera será posible conocer a L y T , esto para que por medio de la ecuación propuesta por Ziegler Nichols, para obtener las variables de control que son ingresados al sistema de control.

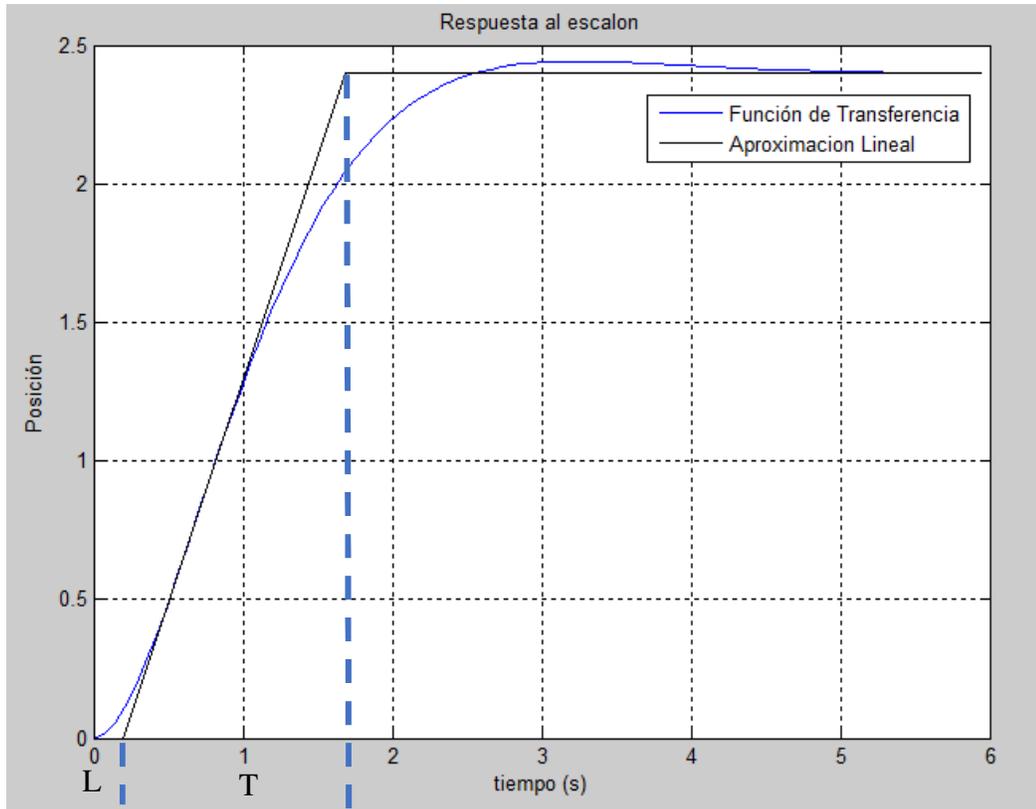


Figura 5.17 Señal con traslape con atraso de primer orden.

Como se puede observar en la señal de la Figura 5.17 es posible obtener los parámetros L y T , teniendo como valores :

$$L = 0.2 \tag{16}$$

$$T = 1.6813 \tag{17}$$

para obtener L y T , se traza una recta tangente al punto de inflexión de la respuesta, la intersección con el eje del tiempo y con el valor final de la amplitud forman las distancias L y T .

Con L y T , se obtienen los parámetros del controlador PID utilizando la tabla 1.

Tipo de controlador	K_p	τ_i	τ_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Tabla 5.1 Valores de sintonización, método uno [38].

Entonces:

$$K_p = 1.2\left(\frac{1.6813}{0.2}\right) \quad (18)$$

$$K_p = 10.0878 \quad (19)$$

$$\tau_i = 2(0.2) \quad (20)$$

$$\tau_i = 0.4 \quad (21)$$

$$\tau_d = 0.5(0.2) \quad (22)$$

$$\tau_d = 0.1 \quad (23)$$

5.2.10 Diagrama de procesos del sistema

En la Figura 5.18 se presenta un diagrama a bloques del sistema completo, se muestra que el sistema está dividido en tres subsistemas, como lo son Control, Tarjeta electrónica y montaje físico. De esta manera tenemos definidas las (posición del eje: voltaje transmitido por el sensor de posicionamiento angular) y la variable de control (sustentación de los motores: señal PWM para velocidad de giro de los motores), así como las salidas de la posición y la velocidad de giro de los motores, con ello la parte esencial lo cual es un bucle

de control (programación a bloques en Simulink), una variable de entrada y una interfaz física.

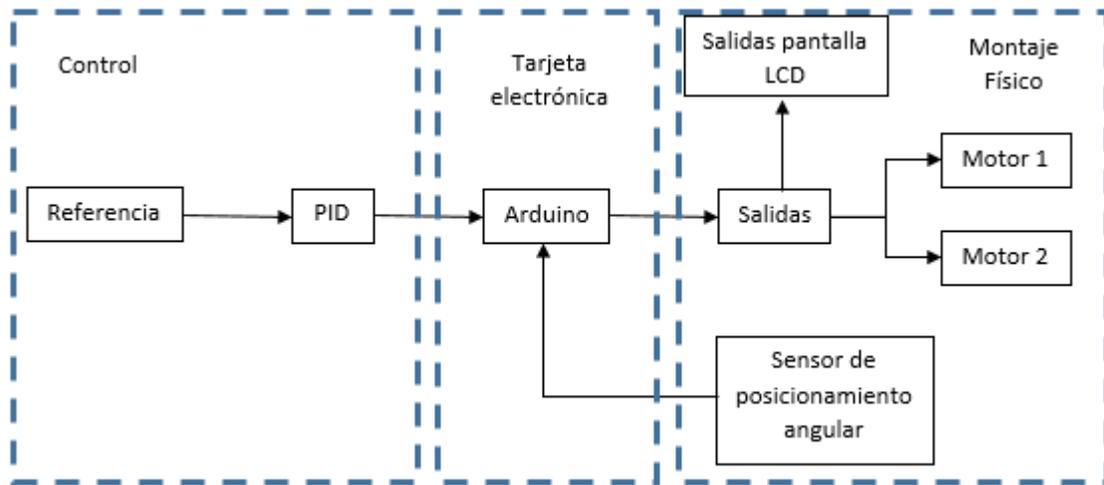


Figura 5.18 Diagrama de procesos del sistema.

5.2.11 Programación en Simulink

Por medio de la programación a bloques es posible realizar un sistema de control. En la Figura 5.19, se muestra la programación de la etapa de control, en conjunto con el envío de datos, de manera que es necesario generar una constante, que es el punto de referencia al cual se quiere que se establezca el sistema, es de gran utilidad la utilización de un bloque de retroalimentación para el sistema, ya que toma de decisiones del sistema no depende sólo de la entrada sino también de la salida.

Mediante el bloque PID es posible implementar un controlador tipo PID donde es posible modificar los parámetros k_p , k_i y k_d . De manera que es necesario convertir los datos para ser enviados de manera serial a la tarjeta de electrónica Arduino.

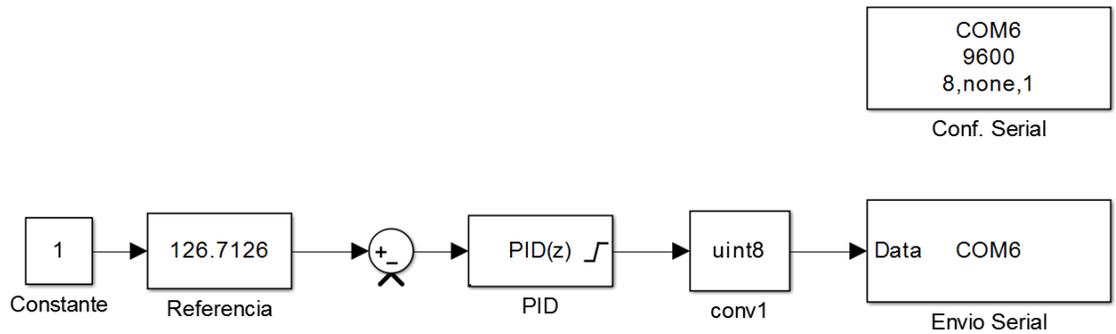


Figura 5.19 Programación de control y envío de datos.

En la Figura 5.20 se muestra realizó la programación de la recepción de datos de manera serial de los datos, que los cuales son procesados para obtener el valor del error, el valor de la referencia y la salida de control. También genera la salida de datos para poder monitorear, así mismo es posible observar los datos en un osciloscopio virtual que genera de Simulink para verificar a manera de prueba las señales con las señales reales del sistema, de tal manera es posible realizar una corroboración de las señales obtenidas en un osciloscopio físico con las de un osciloscopio virtual.

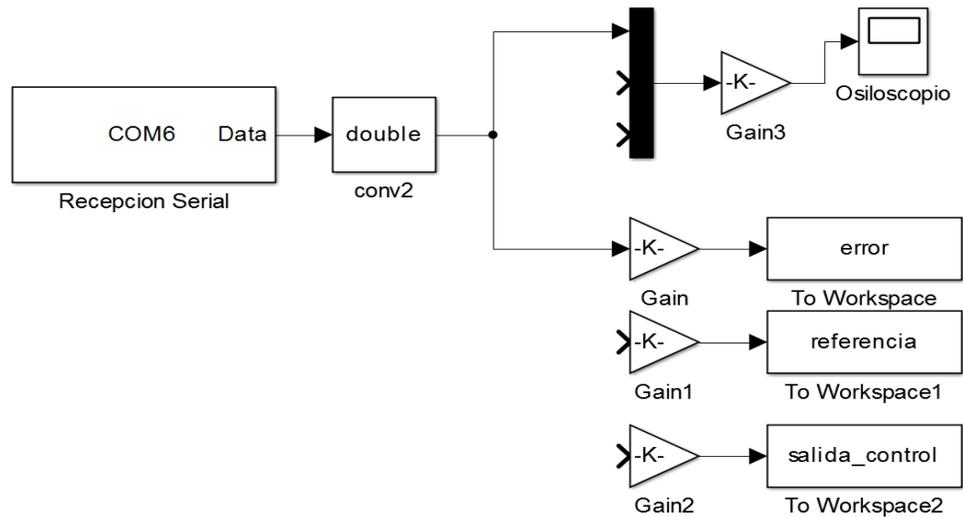


Figura 5.20 Programación de recepción de datos

5.2.12 Programa completo del sistema de control

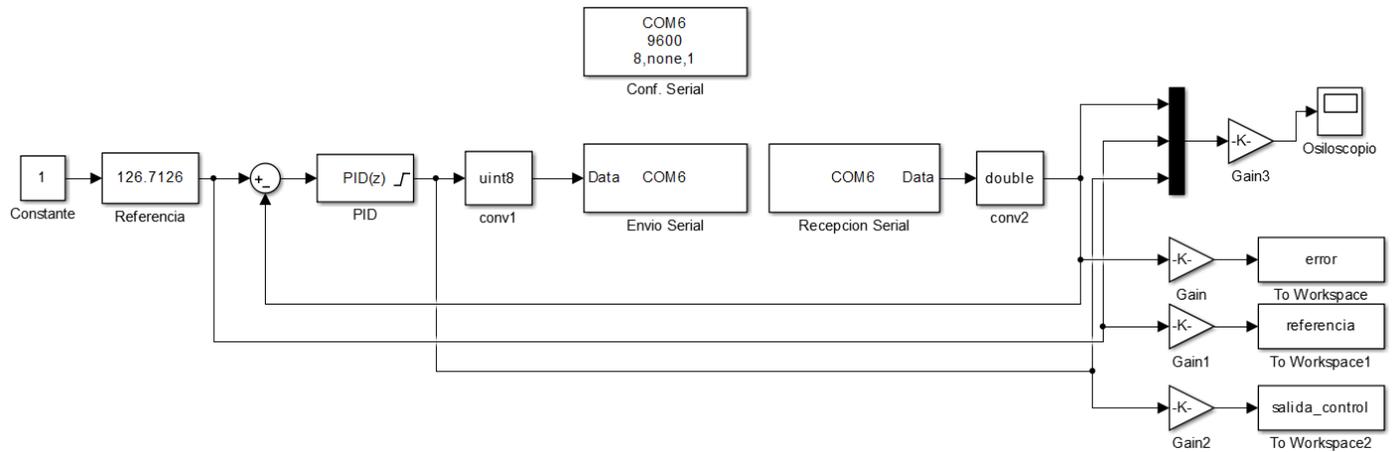


Figura 5.21 Diagrama del programa del sistema de control.

El programa del sistema de control, debe recibir el dato de $V(\theta)$ a través del puerto serie, compararlo con una referencia V_{ref} que se controla mediante un ajuste dentro de la interfaz de Simulink. Mediante un controlador PID, se determina la señal de control de tipo PWM, para regular la velocidad de giro de los motores, posteriormente se envía a través del puerto serie en formato uint8, que es un valor entero sin signo de 8 bits, que toma valores entre 0 y 255, ideales para la función analogWrite () de Arduino.

5.2.13 Agregar datos de las variables de control al módulo PID

Con los datos obtenidos mediante la sintonización por Ziegler Nichols, son los que ingresan en el bloque PID utilizado en la programación en Simulink, y son los parámetros utilizados en la interfaz de la Figura 5.22.

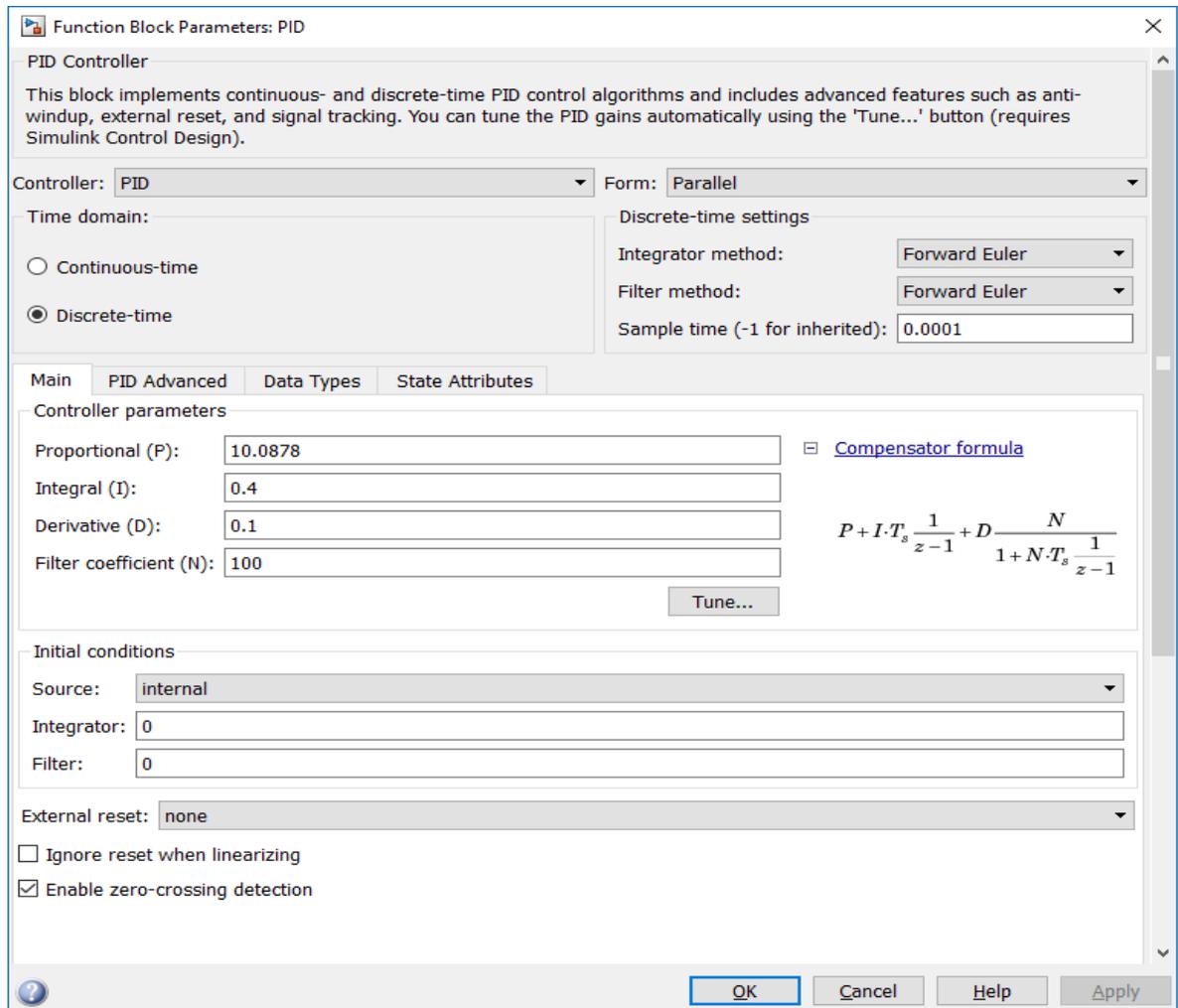


Figura 5.22 Ingresar variables de control al módulo PID.

5.3 Pruebas del sistema

5.3.1 Comprobación de función de transferencia con controlador

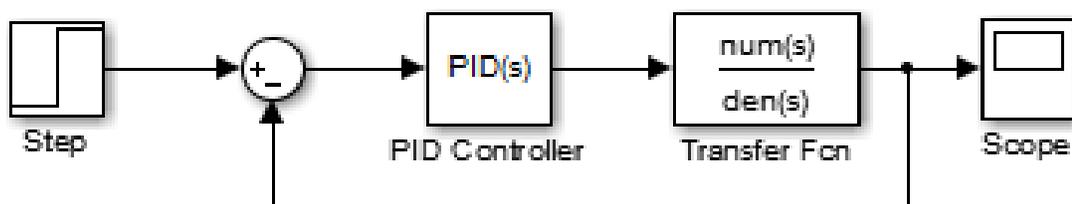


Figura 5.23 Simulación de función de transferencia con controlador PID.

En la Figura 5.24 es posible observar la respuesta del sistema a una señal escalón de 2.5, obteniendo una respuesta de control satisfactoria, lo que comprueba que los datos cálculos matemáticos y la sintonización de sistema se realizó correctamente, de tal manera que se está corroborando de que el sistema se comportara de una manera estable.

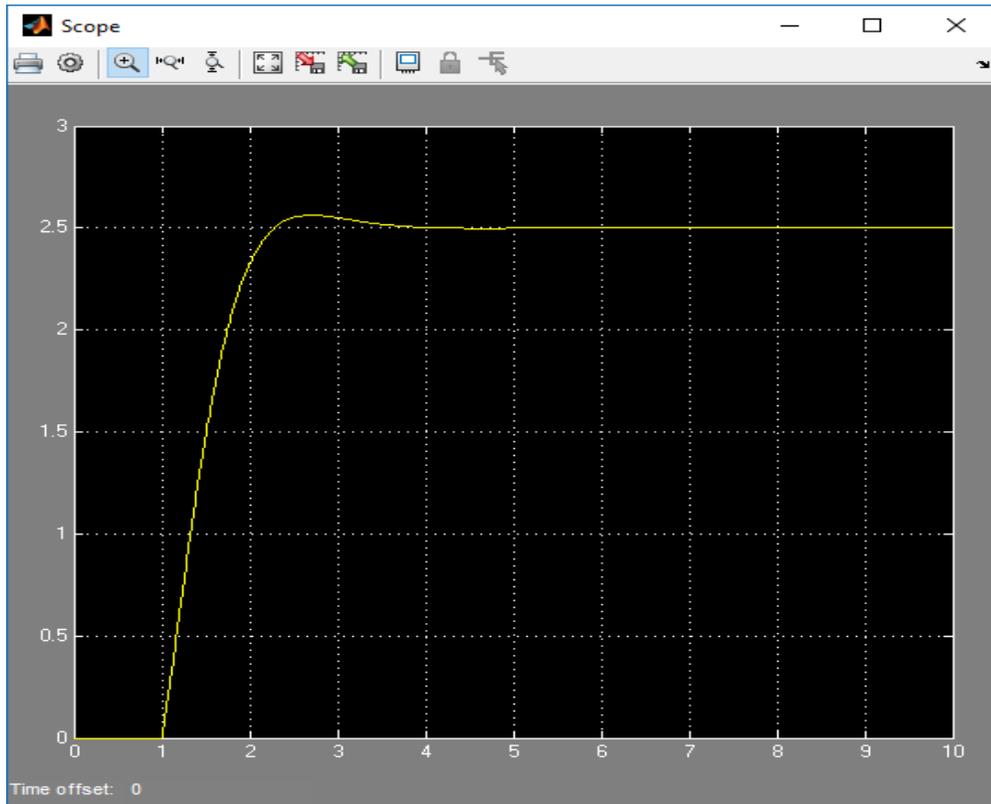


Figura 5.24 Respuesta del sistema simulado.

En la Figura 5.24, se muestra la gráfica de respuesta de la simulación del sistema de control con el fin de corroborar y observar el comportamiento antes de ser puesto a prueba con el prototipo mecánico. Con ello es posible observar que el sistema está funcionando adecuadamente y generando una respuesta de manera óptima. Como se observa la respuesta del sistema de segundo orden, con los parámetros ingresados en el controlador, se aproxima a la de un sistema de primer orden con retardo.

5.3.2 Prueba del sistema mecánico con señal escalón

La respuesta del sistema completo es casi idéntica a la respuesta obtenida en la simulación del controlador PID y la función de transferencia de la Figura 5.24, con lo cual es posible corroborar que los datos simulados son casi idénticos a los que se generaron con el sistema real.

Comparación de sistema real con simulación:

En la Figura 5.25 es posible observar el comportamiento de tres señales las cuales son:

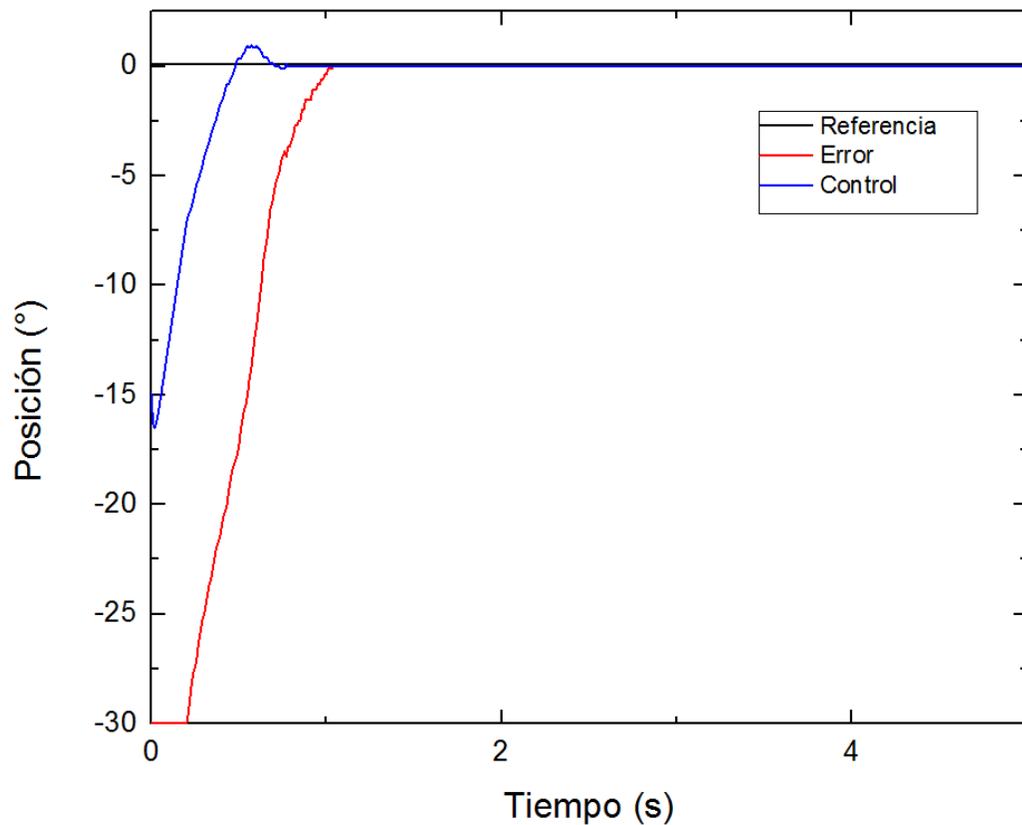


Figura 5.25 Respuesta del sistema a una señal de escalón.

5.3.3 Habilitación de los circuitos de comando de los motores brushless

Para un correcto funcionamiento de los circuitos de comando es necesario generar una señal de comando de 0 a 5V en una señal PWM a una frecuencia de 50Hz. El ciclo de trabajo de los circuitos de control se encuentra entre el 20% al 50%, ya que saliendo de estos límites los motores ya no realizan ninguna función.

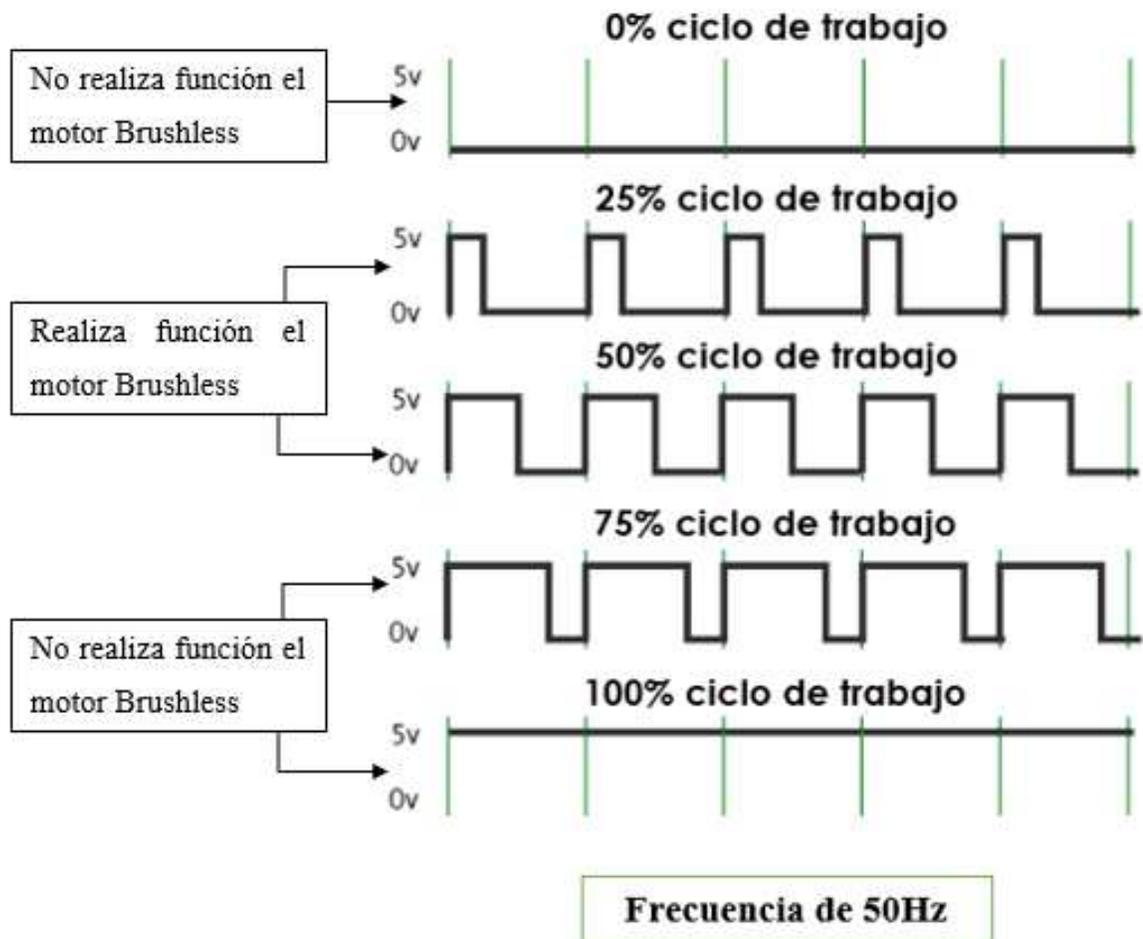


Figura 5.26 Ciclo de trabajo

6 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados del trabajo realizado en el presente documento de tesis, se plantean algunas recomendaciones y trabajo a futuro.

6.1 Resultados

6.1.1 Prueba del sistema con una posición angular de 0° , con respecto a la horizontal.

En la Figura 6.1, se muestran los resultados de una prueba realizada para mantener una posición de 0° , con respecto a la horizontal; al momento de iniciar, el sistema realiza una acción de control para llegar al punto de referencia, una vez que el sistema se encuentra en un estado estable, deliberadamente se genera una perturbación que consiste en colocar una masa con un peso de 100 gramos colocado a una distancia de 10cm, después de que hace efecto la perturbación, el sistema de control toma la acción pertinente y el sistema regresa a su posición de estado estable.

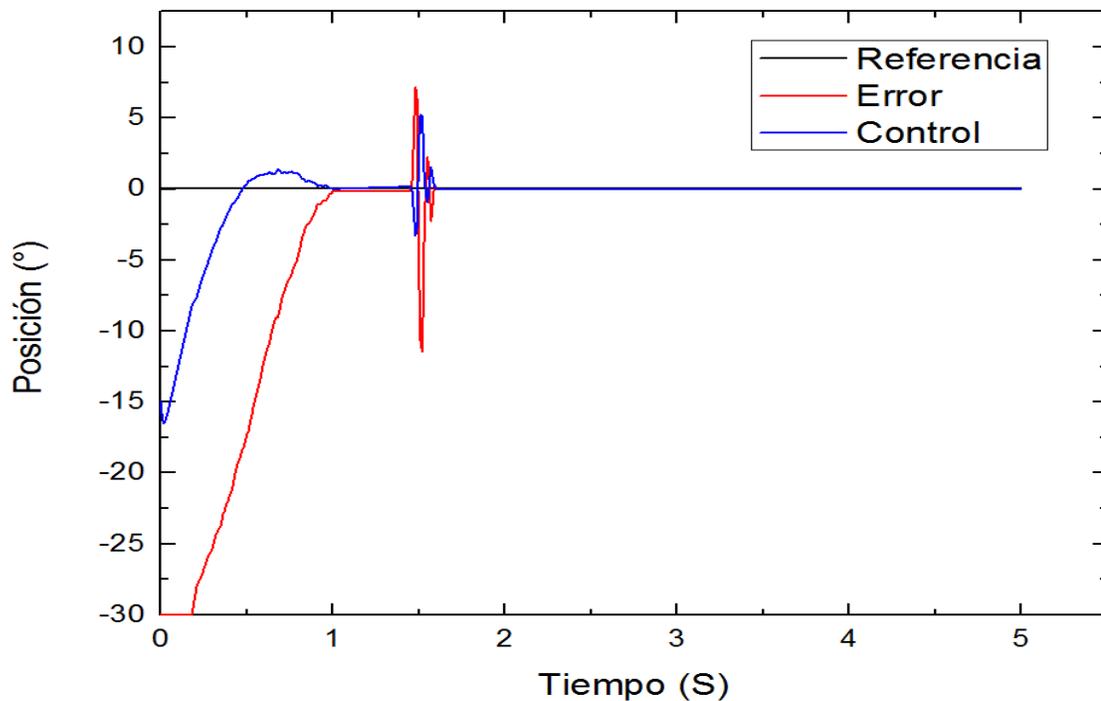


Figura 6.1 Resultados en una posición angular 0° colocando la masa a 10cm del extremo izquierdo.

En la Figura 6.2, se presenta la señal del sensor de posición angular, en respuesta a la perturbación a la que se sometió el sistema para corroborar que el sistema de control se comporte de manera estable.

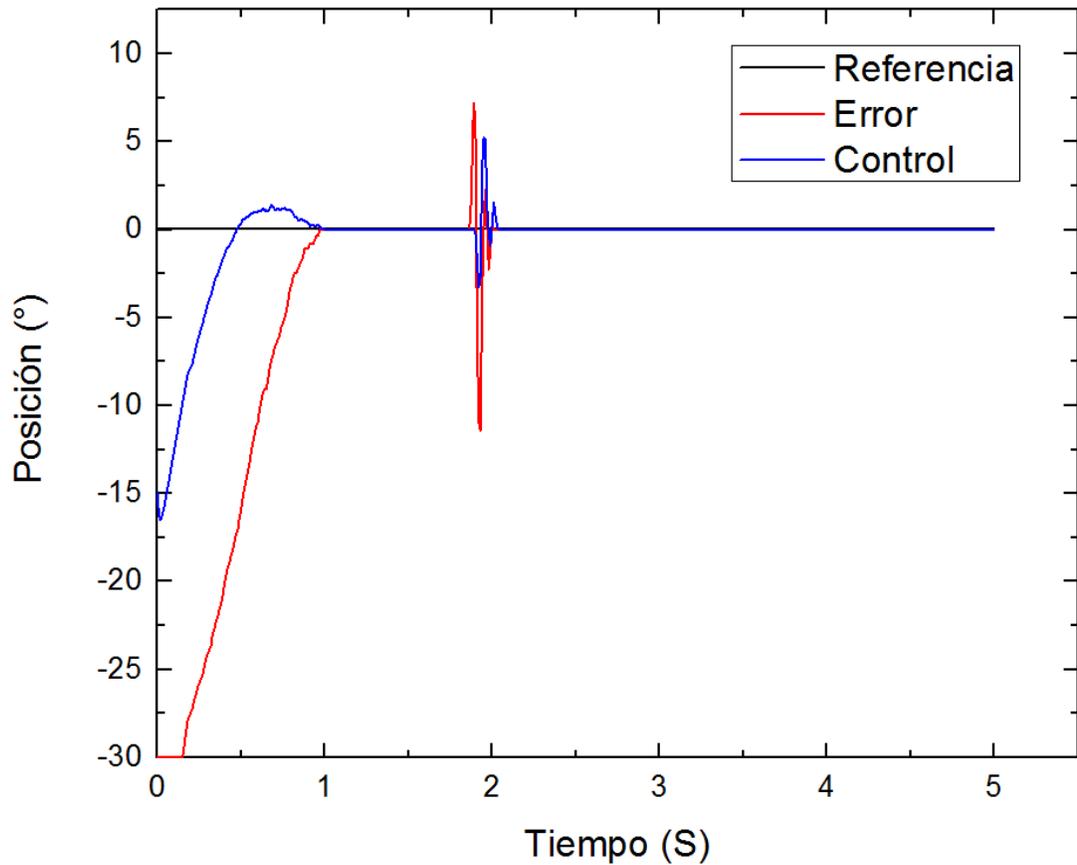


Figura 6.2 Resultados en una posición angular 0° colocando la masa a 10cm del extremo izquierdo.

En la Figura 6.3, se presenta la señal del sensor de posición angular, en respuesta a la perturbación a la que se sometió el sistema de control se comporte de manera estable cuando se coloca la masa de 100 gramos en extremo derecho a una distancia de 10cm.

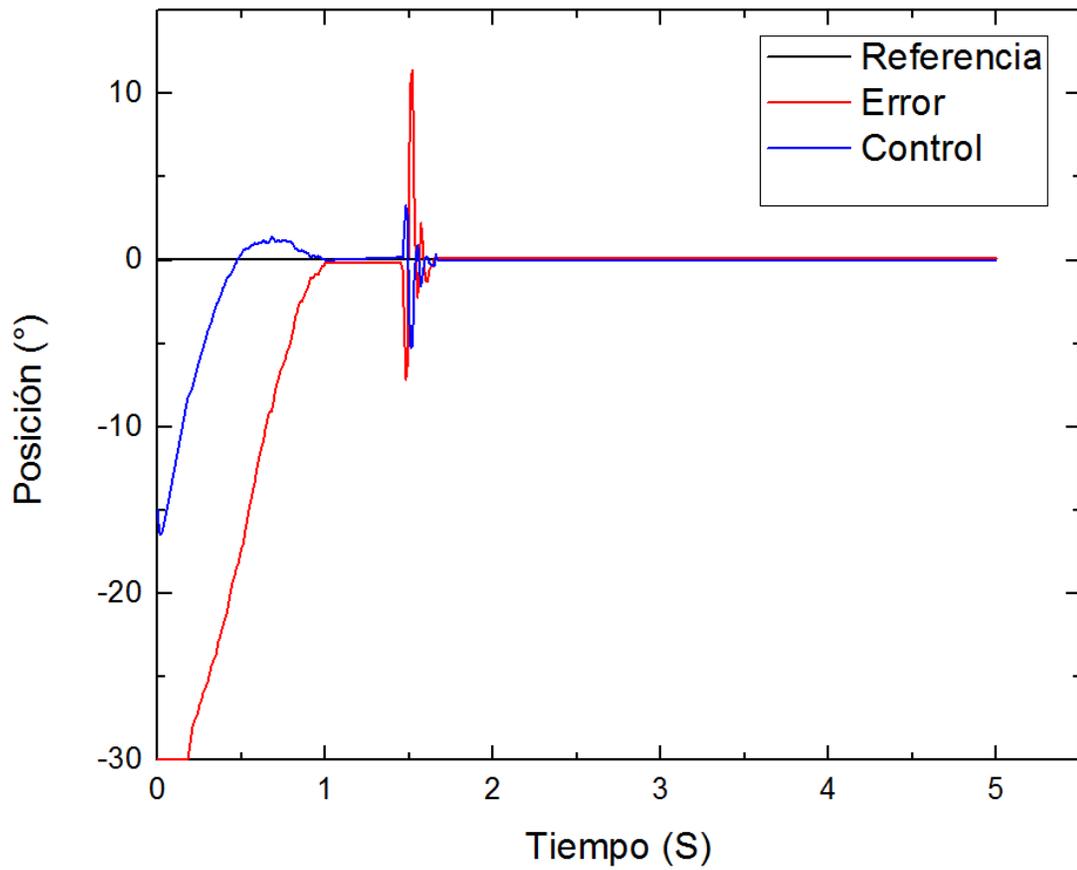


Figura 6.3 Resultados en una posición angular 0° colocando la masa a 10cm del extremo derecho.

En la Figura 6.4, se presenta la señal del sensor de posición angular, en respuesta a la perturbación a la que se sometió el sistema, para corroborar que el sistema de control se comporte de manera estable, esto cuando se coloca la masa de 100 gramos en extremo derecho a una distancia de 10cm.

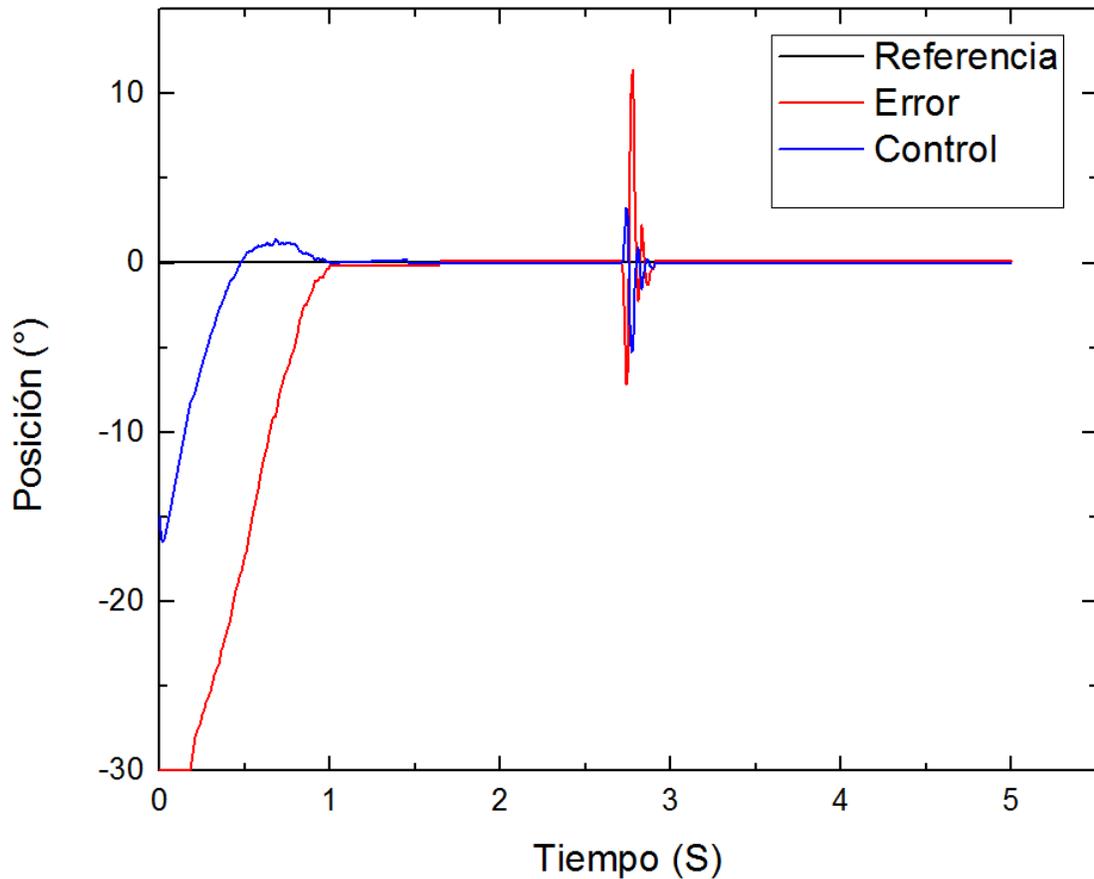


Figura 6.4 Resultados en una posición angular 0° colocando la masa a 10cm del extremo derecho.

6.1.2 Prueba de sistema a una posición angular de -20°

En la Figura 6.5, se muestra el resultado de una prueba cuando se desea mantener una posición de -20° , de manera que, al inicio, el sistema realiza una acción de control para llegar al punto de referencia, una vez que el sistema se encuentra en estado estable, se genera una perturbación a lo cual el sistema realiza su acción de control y regresar al punto de referencia.

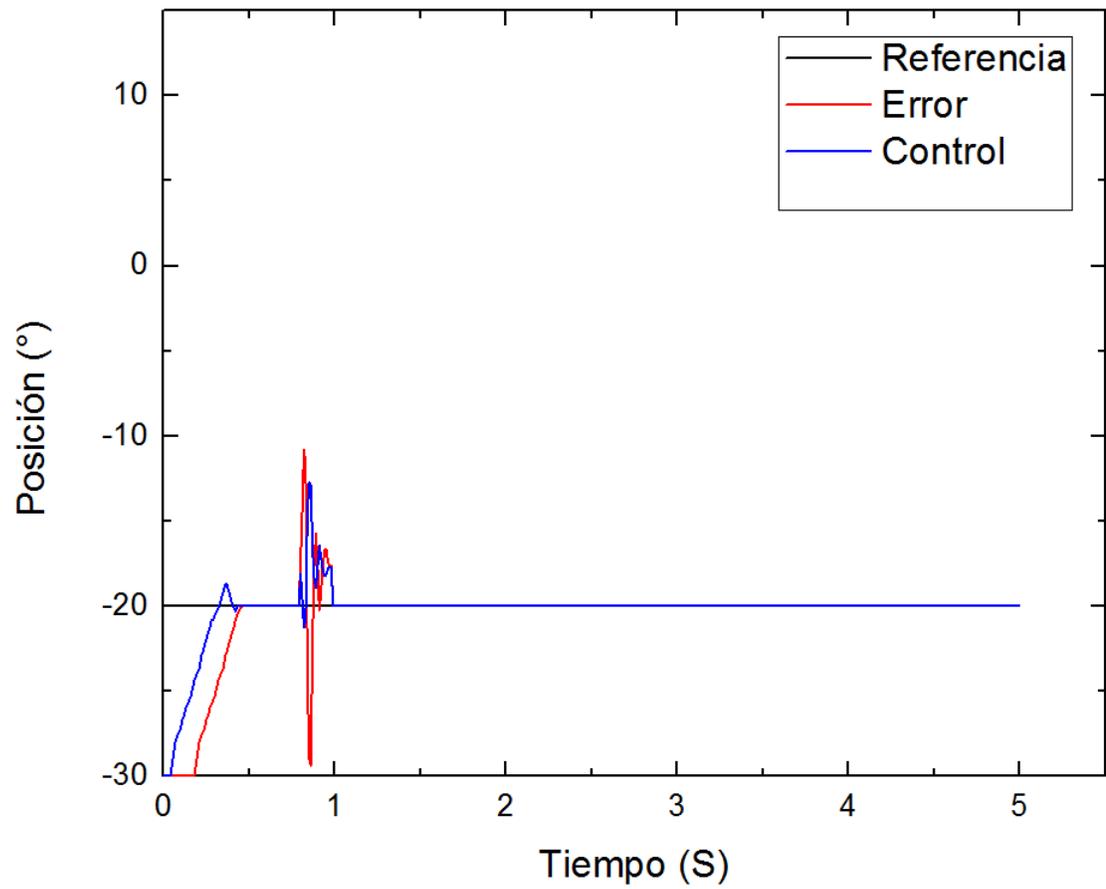


Figura 6.5 Resultados en una posición angular -20° .

En la Figura 6.6, se presenta la señal del sensor de posición angular, en respuesta a la perturbación a la que se sometió el sistema para corroborar que el sistema de control se comporte de manera estable.

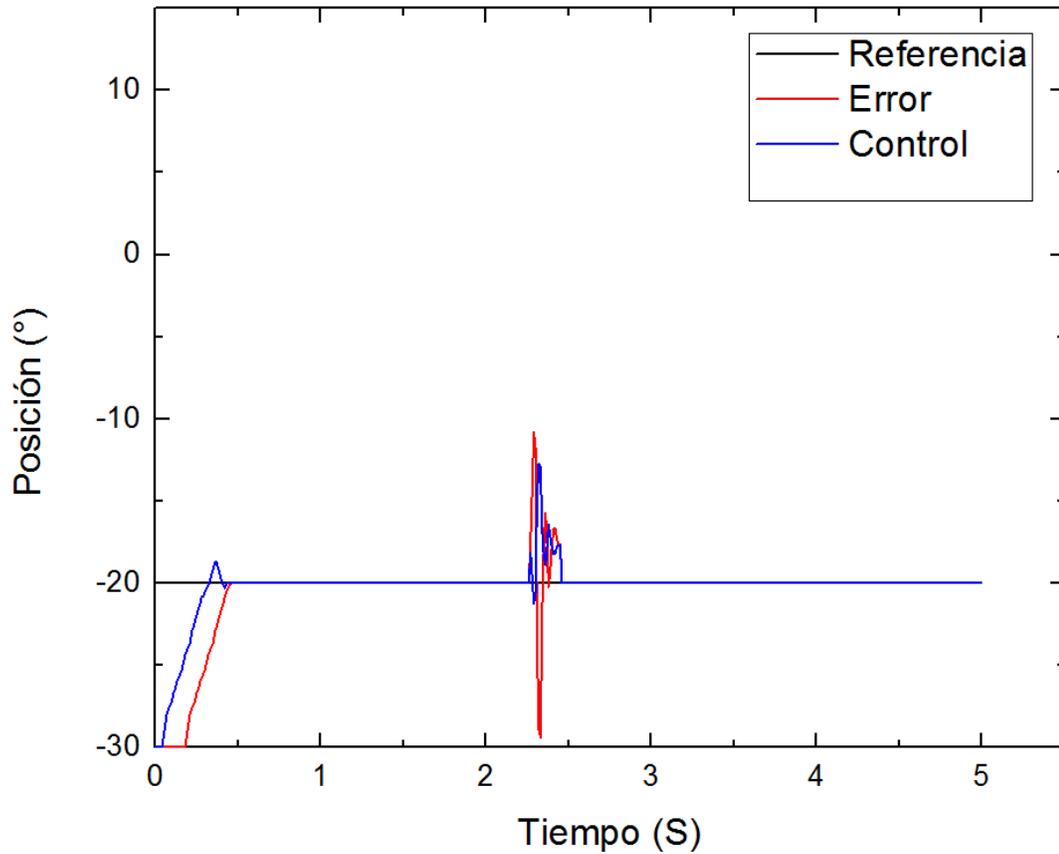


Figura 6.6 Resultados en una posición angular -20°.

6.1.3 Prueba de sistema a una posición angular de 20°

En la Figura 6.7, se muestra el resultado de una prueba cuando se desea mantener una posición de 20°, de manera que, al inicio, el sistema realiza una acción de control para llegar al punto de referencia, una vez que el sistema se encuentra en estado estable, se genera una perturbación a lo cual el sistema realiza su acción de control y regresar al punto de referencia.

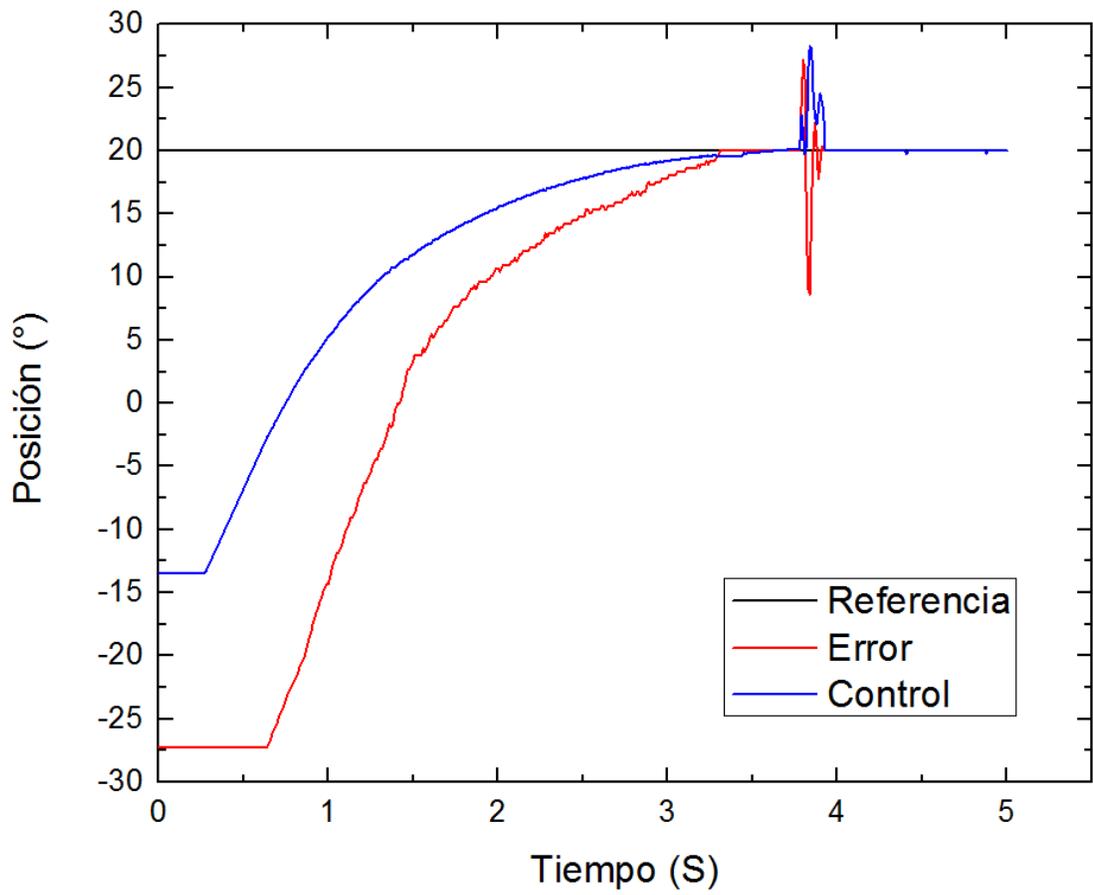


Figura 6.7 Resultados en una posición angular 20°.

En la Figura 6.8 se muestra el resultado de la acción de para regresar a una posición de 20°.

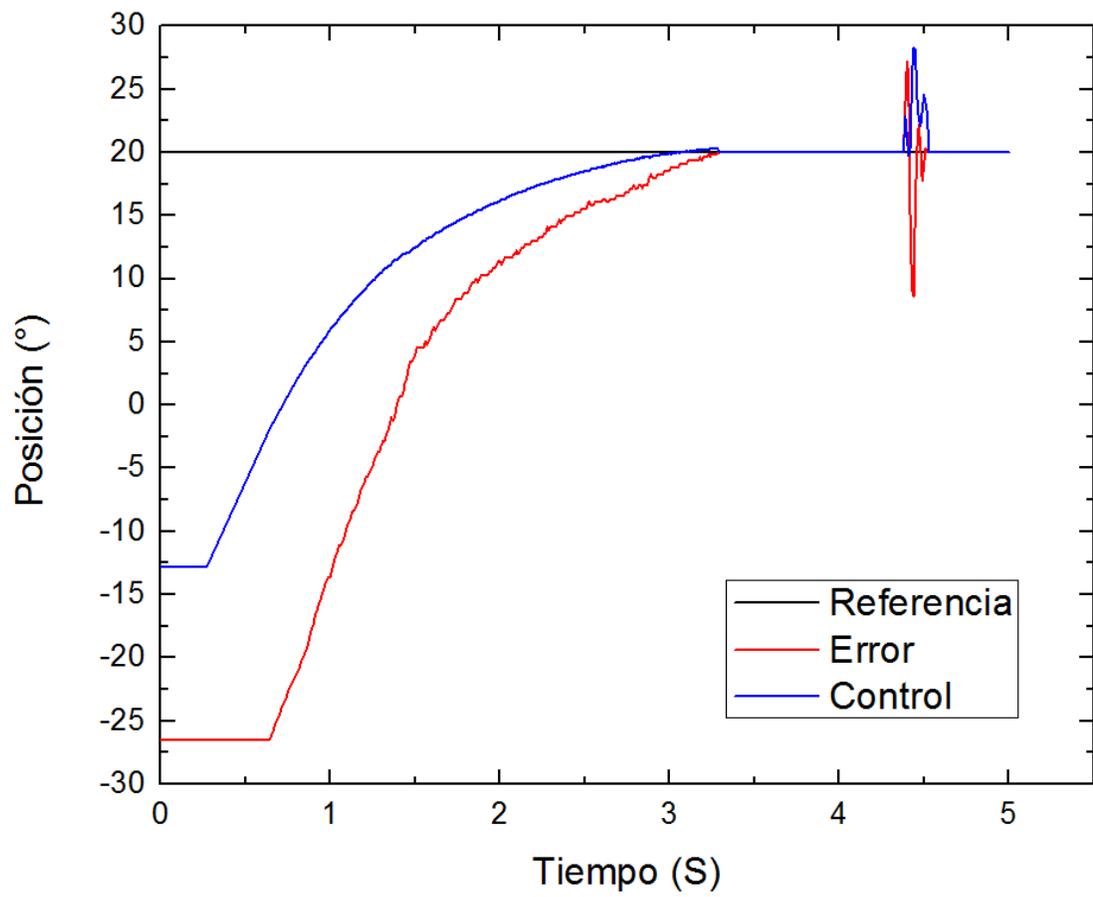


Figura 6.8 Resultados en una posición angular 20°.

6.2 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos del sistema en comparación al que tiene por nombre “*CONTROL DE BALANZA AÉREA MEDIANTE LÓGICA DIFUSA*”, tiene una mayor eficiencia la implementación de un controlador PID a este tipo de sistemas. La respuesta en con un controlador clásico PID es más estable no generando sobre impulsos en la amplitud es menor con un controlador clásico. Observe en la Figura 6.9 la respuesta del sistema con lógica difusa, en comparación en la Figura 6.2.1.1 con un controlador PID.

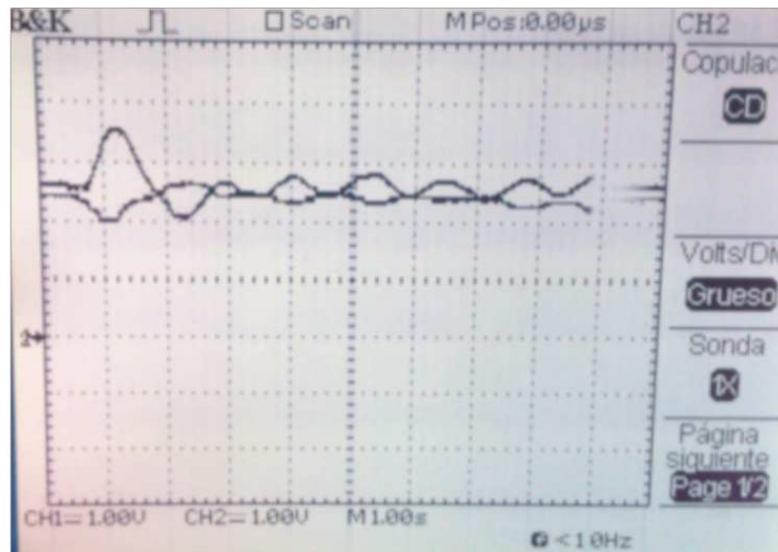


Figura 6.9 Respuesta de sistema con lógica difusa [9]

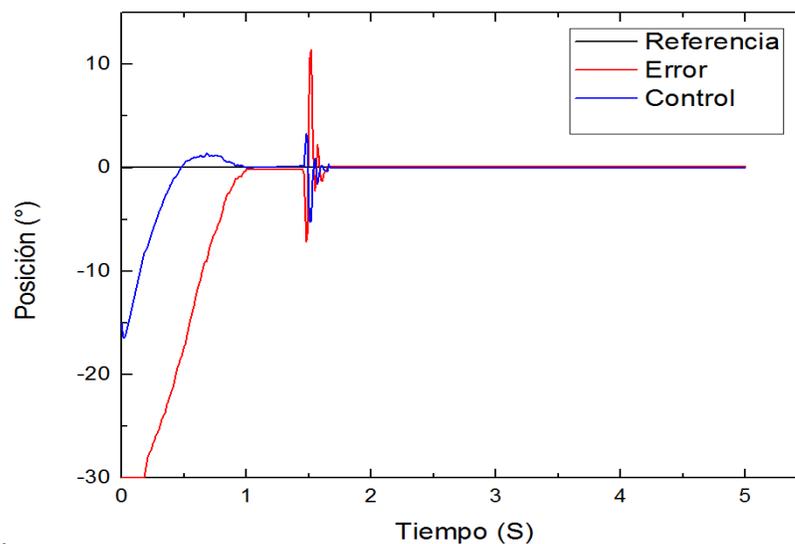


Figura 6.10 Respuesta de sistema con control PID de sistema presentado.

CONCLUSIONES

El sistema mecánico, a pesar de ser simple en su construcción contiene cierta complejidad en su control. Además de trabajar con las masas de las varillas y de los motores, se presentan otros factores como: la gravedad y la inercia. Esta es la más crítica a controlar: puede causar que el sistema se salga de su referencia si no se controla existe un control correcto.

Mediante la creación del sistema de control es posible automatizar cualquier tipo de sistemas. En la vida diaria son utilizados sin que nos demos cuenta. Así mismo, en ocasiones la lógica difusa es más útil en algunas problemáticas. Esta pertenece a una rama de la inteligencia artificial, asemejando la toma de decisiones a como las realiza un humano. Pero en este caso, no es conveniente su utilización de la lógica difusa. Entonces el sistema presentado en este trabajo, responde a un funcionamiento de un modelo matemático, donde es más eficiente la utilización de un controlador PID a un controlador difuso.

En base a las pruebas realizadas, se comprueba que la implementación de un sistema de control PID: responde de mejor manera respecto al tiempo y se puede incursionar en vehículos aéreos no tripulados de tipo multi-rotor.

Se comprueba que mediante el diseño e implementación de la instrumentación electrónica y la programación en un sistema digital de un control de lazo cerrado es posible mantener de manera automática una posición inicial del sistema mecánico balancín. A través del monitoreo de su posición angular para generar el ajuste de la velocidad de sus motores para que dicha posición se mantenga si ocurre alguna perturbación en el sistema. en una posición inicial preestablecida en un intervalo aproximado de -30 a 30° con respecto al eje horizontal.

Por medio de la utilización de motores sin escobillas es de mejor utilidad, ya que son motores de alta velocidad. Por lo que la implementación de estos actuadores en este tipo de sistemas es de mayor eficiencia ya que la velocidad de respuesta en estos sistemas es primordial.

Se comprendió que en los circuitos de comando para los motores eléctricos: los cuales son los encargados de proporcionar las cualidades físicas básicas, esto para que puedan funcionar de una mejor manera, así mismo para que los motores sean habilitados y puedan trabajar es necesario generar una señal de modulación por ancho de pulso con una frecuencia de Hz y una amplitud de 0 a 5V, además el ciclo de trabajo de los motores oscila del 20% del ciclo de trabajo al 50%. Si el ciclo de trabajo se excede de estos rangos el motor brushless no realiza ninguna función.

Por medio de la implementación de un sistema de control, es posible realizar que los sistemas se comporten de una manera, la cual sea necesaria para cada problema en específico. La implementación de un sistema de control a lazo abierto no es tan eficiente, ya que no mide la salida ni se retroalimenta, con lo cual la exactitud del sistema va a depender de la calibración del controlador. Con lo que la utilización de un sistema de control a lazo cerrado tiene mayor eficiencia ya que este cuenta con una retroalimentación, con lo que la salida vuelve al principio para realizar un análisis de la diferencia y en una segunda opción se ajuste y de disminuya el error.

Las implementaciones de estos tipos de sistemas son de gran utilidad para sistemas de control de aterrizaje y despegue para vehículos aéreos no tripulados de tipo multi-rotor (MAV's). Con lo cual se está realizando una incursión de sistemas de control a este tipo de vehículos.

7 Referencias

- [1] V. Viltres La Rosa, «Control de posición de un balancín con motor y hélice,» de *Tesis de Licenciatura*, Valladolid, España, Escuela de Ingenierías Industriales, 2012, p. 59.
- [2] K. Ogata, *Sistemas de control en tiempo directo*, Madrid: Prentice-Hall, 1996.
- [3] K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderno*, Madrid: Prentice-Hall Hispanoamerica, 2010.
- [4] A. Martín Ballesteros y M. Del Río Carbajo, «Control de Posición de un Balancín con Arduino,» de *Tesis de Licenciatura*, Valladolid España, Escuela de Ingenierías Industriales, 2013, p. 64.
- [5] P. Ñeco R., O. García, N. García y R. Aracil, *Apuntes de Sistemas de Control*, Elche España: ECU, 2003.
- [6] A. Mohamed A, E.-D. Mohamed S., E.-T. Ahmed A. y D. Tarek N., «Attitude Stability of Quadcopter Using Classic Control with Angular Acceleration,» *IRACST - International Journal of Computer Science and Information Technology & Security*, vol. 5, nº 4, p. 955, 2015.
- [7] L. F. Lozano Valencia, L. F. Rodríguez García y D. Giraldo Buitrago, «Diseño, Implementación y Validación de un Controlador PID Autosintonizado,» *TecnoLógicas*, vol. 1, nº 28, p. 55, 2012.
- [8] Y. Lozano y O. Gutiérrez., «Design and Control of a Four-Rotary-Wing Aircraft,» *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, vol. 11, nº 14, p. 46, 2016.
- [9] E. Barrera E., C. Balbuena y R. Hernández, «Control de Balanza Aérea Mediante Lógica Difusa,» *Ideas en Cinecia*, vol. 1, nº 1, p. 55, 2013.

- [10] J. Díaz F., «Planificación Óptima Discreta para Problemas NP-Completo mediante Algoritmos Inmunológicos Artificiales,» de *Tesis de Maestría en Ciencias en Sistemas Digitales*, Tijuana B.C México, Instituto Politécnico Nacional Centro de Investigaciones y Desarrollo De Tecnología Digital, 2011, p. 146.
- [11] J. C. Ambriz Polo, «Diseño e Implementación de un controlador PID autoajustable basado en un algoritmo híbrido,» de *Maestría en Ciencias de la Computación*, Atlacomulco, México, Universidad Autónoma del Estado de México Centro Universitario UAEM Atlacomulco, 2015, p. 86.
- [12] M. E. Anaya Pérez, V. H. Benítez Baltazar, J. H. Pacheco Ramírez y F. Montaña Valle, «Diseño de Controladores P, PI y PID para el Comportamiento Dinámico de un Servo-Sistema Hidráulico, Basado en Desarrollo Experimental,» *Investigación*, vol. 2, nº 16, p. 21, 2014.
- [13] J. Díaz y F. Muñoz, «Comparación entre un Controlador Difuso y un Controlador PID para un motor Universal,» *Automatización*, vol. 1, nº 1, p. 7, 2012.
- [14] E. A. Prieto Castiblanco, «Control de posición de un balancín Motor-Hélice,» *Control Digital*, vol. 10, nº 2, p. 15, 2015.
- [15] D. Jaramillo, «Estabilización de un Péndulo Invertido aplicando MPC y LQR,» *Revista Politécnica*, vol. 1, nº 2, p. 8, 2015.
- [16] J. Hua y L. Zhiyong, «Design of Neural Network PID Controller Based on Brushless DC Motor,» *Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, vol. 10, nº 3, p. 150, 2012.
- [17] V. Ramos Vicedo, «Diseño e Implementación de un Quadcopter basado en microcontrolador Arduino,» *Trabajo de Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales*, vol. 1, nº 1, p. 102, 2013.

- [18] W. Wang, H. Ma, X. Min y W. Liguó , «Attitude and Altitude Controller Design for,» *School of Information and Control, Nanjing University of Information Science & Technology*, vol. 1455, nº 219, pp. 1-10, 2013.
- [19] Z. Fang He y L. Zhao, «A Simple Attitude Control of Quadrotor Helicopter Based on Ziegler-Nichols Rules for Tuning PD Parameters,» *Scientific World Journal*, vol. 10, nº 1155, pp. 15-20, 2014.
- [20] A. Francos J., « Design of an intelligent fuzzy logic controller for a quadrotor helicopter,» *Marine Science and Engineering*, vol. 25, nº 15, pp. 1-65, 2016.
- [21] L. Argentim M., . R. Willian C., P. Santos E. y R. Aguiar A., «PID, LQR and LQR-PID on a Quadcopter Platform,» *FAPESP*, vol. 4089, nº 3, pp. 9-12, 2012.
- [22] D. Tarek N. y S. Yoshida, «System Identification and Adaptive Control of Mass-Varying Quad-Rotor,» *EVERGREEN*, vol. 4, nº 1, pp. 58-66, 2017.
- [23] R. Pallás Areny, *Sensores y Actuadores*, Barcelona: Marcombo Editores, 1993.
- [24] Intersil, « Hoja de datos X9015,» Intersil Corporation , Irlanda, 2015.
- [25] STMicroelectronics, «General purpose JFET quad operational amplifiers,» STMicroelectronics, Italy, 2013.
- [26] ©. 2. Arduino, «Arduino,» Arduino, 15 Enero 2017. [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/>. [Último acceso: 29 Julio 2017].
- [27] A. Villarruel Parra, «Técnicas de Control PWM para un Convertidor Multiniveles Híbrido,» de *Tesis de Maestría en Ciencias de Ingeniería de Microelectrónica*, México,D.F., Instituto Politécnico Nacional , 2010, pp. 1-120.
- [28] G. S. Pérez de Lazárraga y J. M. Corres Sanz, «Control motor brushless,» de *Tesis de Licenciatura*, Navarra, Universidad Publica de Navarra, 2015, pp. 1-46.
- [29] M. Company, «Datasheet ESC 30A,» MultiStar Company, Inglaterra, 2016.

- [30] T. Instrument, «Datasheet I2C,» Texas Instrument Company, Estados Unidos de America, 2016.
- [31] H. Company, «Datasheet Hitachi HD44780,» Hitachi Company, Japon, 2010.
- [32] O. Catarino Aguilar, de *Tesis de Licenciatura*, Atlacomulco, México, Centro Universitario UAEM Atlacomulco, 2015, pp. 1-120.
- [33] MathWorks, «MATLAB Información,» MathWorks, Estados Unidos, 2017.
- [34] F. D. J. García Pérez, «Desarrollo de Componentes de Software Local y Distribuido bajo la Plataforma COM-SOAP, que Encapsule las Operaciones Matriciales de MATLAB,» de *Tesis de Licenciatura*, Huajuapán de León, Oaxaca, Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2005, pp. 5-15.
- [35] MathWorks, «Información Simulink,» MathWorks, Estados Unidos, 2017.
- [36] ©. 2. Arduino, «Librería Servo.h,» © 2017 Arduino, Italia, 2017.
- [37] ©. 2. Arduino, «Librería Wire.h,» © 2017 Arduino, Italia, 2017.
- [38] J. Contreras Morales, Reglas de Sintonía de Controladores Digitales, Mexico: Departamento de Control, División de Ingeniería Eléctrica, 2006.

ANEXOS

A2212/13T TECHNICAL DATA



No. of Cells:	2 - 3 Li-Poly 6 - 10 NiCd/NiMH
Kv:	1000 RPM/V
Max Efficiency:	80%
Max Efficiency Current:	4 - 10A (>75%)
No Load Current:	0.5A @10V
Resistance:	0.090 ohms
Max Current:	13A for 60S
Max Watts:	150W
Weight:	52.7 g / 1.86 oz
Size:	28 mm dia x 28 mm bell length

Shaft Diameter:	3.2 mm
Poles:	14
Model Weight:	300 - 800g / 10.5 - 28.2 oz

Manual of Speed Controller for Brushed Motor

Thanks for purchasing our Electronic Speed Controller (ESC). High power system for RC model can be very dangerous, so we strongly suggest you read this manual carefully. In that we have no control over the correct use, installation, application, or maintenance of our products, no liability shall be assumed nor accepted for any damages, losses or costs resulting from the use of the product. Any claims arising from the operating, failure or malfunctioning etc. will be denied. We assume no liability for personal injury, property damage or consequential damages resulting from our product or our workmanship. As far as is legally permitted, the obligation to compensation is limited to the invoice amount of the affected product.

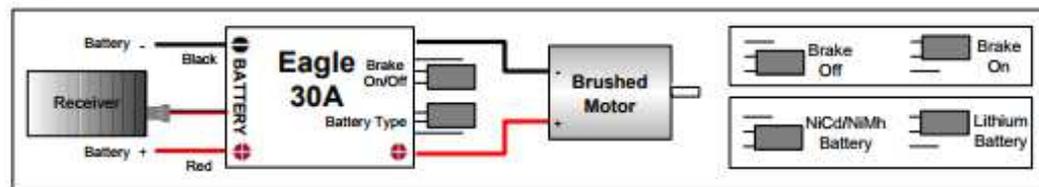
Features:

- ◆ The ESC is controlled by advanced microprocessor.
- ◆ Compatible with lithium battery and nickel battery.
- ◆ Multiple protection features: Low-voltage cut-off protection / over-heat protection / throttle signal loss protection.
- ◆ Smooth, linear and precise throttle response.
- ◆ The brake function can be enabled or disabled by a jumper.

Specifications:

Eagle Series									
Class	Model	Cont. Current	Burst Current (>10s)	BEC Mode	BEC Output	Battery Cell		Weight	Size L*W*H
						Li-poly	NiMH		
20A	Eagle-20A	20A	25A	Linear	5V/1A	2-3	4-10	17g	45*21*8
30A	Eagle-30A	30A	40A	Linear	5V/1A	2-3	4-10	21g	45*21*8
40A	Eagle-40A	40A	50A	Linear	5V/1A	2-4	4-12		
	Eagle-40A-E	40A	50A	Linear	5V/2A	2-4	4-12		
50A	Eagle-50	50A	60A	Linear	5V/1A	2-4	4-12		
	Eagle-50-E	50A	60A	Linear	5V/2A	2-4	4-12		
BEC Output Capability			Linear Mode BEC(5V/2A)						
			2S Li-Poly		3S Li-Poly		4S Li-Poly		
Standard micro servos(Max.)			5		4		2		

Wiring Diagram:



Features Explanation:

1. **Brake Settings:** The brake function can be enabled or disabled by a jumper.
2. **Battery Type:** The battery type can be chosen by a jumper.
3. **Low Voltage Protection Threshold:** For lithium batteries, the threshold for each cell is 3.0V. When the battery's voltage is less than the threshold, the ESC will gradually reduce the output power to prevent the battery from over discharging.
4. **PWM Frequency:** 2KHz.
5. **Over-heat protection:** When the temperature of the ESC is over 110 Celsius degree, the ESC will gradually reduce the output power.
6. **Throttle signal loss protection:** The ESC will gradually reduce the output power if the throttle signal is lost for 1 second, further loss for 2 seconds will cause its output to be completely cut-off.

Begin To Use Your New ESC:

Please check all the connections before running your model aircraft, and please start the ESC in the following sequence:

1. Correctly set the 2 jumpers according to the aircraft and battery you are using.
2. Move the throttle stick to the lowest position, move the throttle trim to neutral position or lowest position, and then switch on the transmitter.
3. Connect the battery pack to the ESC with the correct polarity.
4. The ESC begins the self-test process, if a long "beep-----" tone is emitted, that means the self-test is OK, the aircraft is ready to go flying.
5. Speed up smoothly and check the running direction of the motor, if it runs in the opposite direction, please swap the output wire connections with the motor.

Alert Tone

1. Input voltage is abnormal: The ESC begins to check the voltage when the battery pack is connected, if the voltage is not in the acceptable range, such an alert tone will be emitted: "beep-beep---, beep-beep---,beep-beep---" (A short "beep-" + a long "beep---")
2. Throttle signal is lost: When the ESC can't detect the normal throttle signal, such an alert tone will be emitted: "beep--, beep--, beep--". (Every "beep--" has a time interval of about 1 second).
3. Throttle stick is not at the lowest position: When the ESC is powered up, if the throttle stick is not at the lowest position, such an alert tone will be emitted: "beep-, beep-, beep-". (Every "beep-" has a time interval of about 0.25 second).

Manual of Speed Controller for Brushed Motor

Trouble Shooting

Trouble	Possible Reason	Action
After power on, the motor does not work, no sound is emitted	The connection between battery pack and ESC is not correct The connection between ESC and motor is not correct	Check all the connections. Replace the bad connector.
After power on, the motor does not work, such an alert tone is emitted: "beep-beep----, beep-beep----, beep-beep----"	Input voltage is too high or too low.	Check the voltage of battery pack Check the battery type setting jumper
After power on, the motor does not work, such an alert tone is emitted: "beep-, beep-, beep-". (Every "beep-" has a time interval of about 1 second).	Throttle signal is irregular	Check the receiver and transmitter Check the cable of throttle channel
After power on, the motor does not work, such an alert tone is emitted: "beep-, beep-, beep-". (Every "beep-" has a time interval of about 0.25 second)	The throttle stick is not at the bottom(lowest) position	Move the throttle stick to the lowest position
The motor runs in the opposite direction	The connection between ESC and the motor need to be changed.	Swap the wire connections between ESC and motor
The motor speed is gradually reduced, and cannot be speeded up again	The ESC is over-heat and begin to protect itself ESC has entered Low Voltage Protection mode	Land RC model as soon as possible, cool the ESC before the next flight Land RC model as soon as possible, replace the battery pack with a full charged one
The motor stop running	Throttle signal is lost	Check the receiver and transmitter Check the cable of throttle channel
Random stop or restart or irregular working state	Some Connections are not reliable There is strong Electro - Magnetic interference in flying field.	Check all the connections: battery pack connection, throttle signal cable, motor connections, etc. Reset the ESC to resume normal operation. If the function could not resume, you might need to move to another area to fly.

TL08xx JFET-Input Operational Amplifiers

1 Features

- Low Power Consumption: 1.4 mA/ch Typical
- Wide Common-Mode and Differential Voltage Ranges
- Low Input Bias Current: 30 pA Typical
- Low Input Offset Current: 5 pA Typical
- Output Short-Circuit Protection
- Low Total Harmonic Distortion: 0.003% Typical
- High Input Impedance: JFET Input Stage
- Latch-Up-Free Operation
- High Slew Rate: 13 V/ μ s Typical
- Common-Mode Input Voltage Range Includes V_{CC} .

2 Applications

- Tablets
- White goods
- Personal electronics
- Computers

3 Description

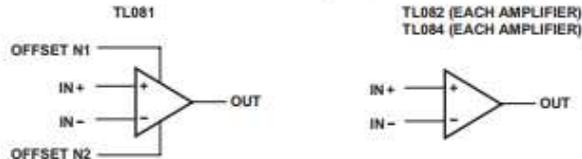
The TL08xx JFET-input operational amplifier family is designed to offer a wider selection than any previously developed operational amplifier family. Each of these JFET-input operational amplifiers incorporates well-matched, high-voltage JFET and bipolar transistors in a monolithic integrated circuit. The devices feature high slew rates, low input bias and offset currents, and low offset-voltage temperature coefficient.

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
TL084xD	SOIC (14)	8.65 mm × 3.91 mm
TL08xxFK	LCCC (20)	8.89 mm × 8.89 mm
TL084xJ	CDIP (14)	19.56 mm × 6.92 mm
TL084xN	PDIP (14)	19.3 mm × 6.35 mm
TL084xNS	SO (14)	10.3 mm × 5.3 mm
TL084xPW	TSSOP (14)	5.0 mm × 4.4 mm

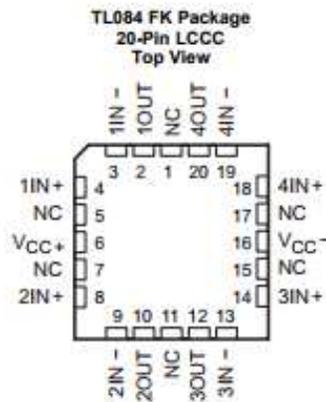
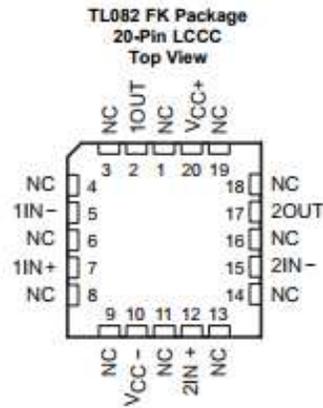
(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

Schematic Symbol

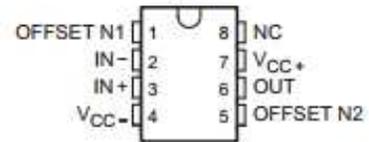


An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

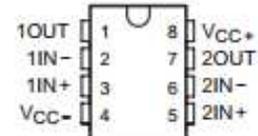
5 Pin Configuration and Functions



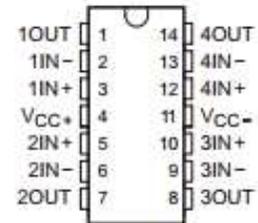
TL081 and TL081x D, P, and PS Package
8-Pin SOIC, PDIP, and SO
Top View



TL082 and TL082x D, JG, P, PS and PW Package
8-Pin SOIC, CDIP, PDIP, SO, and TSSOP
Top View



TL084 and TL084x D, J, N, NS and PW Package
14-Pin SOIC, CDIP, PDIP, SO, and TSSOP
Top View



Pin Functions

NAME	PIN					I/O	DESCRIPTION
	TL081	TL082		TL084			
	SOIC, PDIP, SO	SOIC, CDIP, PDIP, SO, TSSOP	LCCC	SOIC, CDIP, PDIP, SO, TSSOP	LCCC		
1IN-	—	2	5	2	3	I	Negative input
1IN+	—	3	7	3	4	I	Positive input
1OUT	—	1	2	1	2	O	Output
2IN-	—	6	15	6	9	I	Negative input
2IN+	—	5	12	5	8	I	Positive input
2OUT	—	7	17	7	10	O	Output
3IN-	—	—	—	9	13	I	Negative input
3IN+	—	—	—	10	14	I	Positive input
3OUT	—	—	—	8	12	O	Output
4IN-	—	—	—	13	19	I	Negative input
4IN+	—	—	—	12	18	I	Positive input
4OUT	—	—	—	14	20	O	Output

PCF8574 Remote 8-Bit I/O Expander for I²C Bus

1 Features

- Low Standby-Current Consumption of 10 μ A Max
- I²C to Parallel-Port Expander
- Open-Drain Interrupt Output
- Compatible With Most Microcontrollers
- Latched Outputs With High-Current Drive Capability for Directly Driving LEDs
- Latch-Up Performance Exceeds 100 mA Per JESD 78, Class II

2 Applications

- Telecom Shelters: Filter Units
- Servers
- Routers (Telecom Switching Equipment)
- Personal Computers
- Personal Electronics
- Industrial Automation
- Products with GPIO-Limited Processors

3 Description

This 8-bit input/output (I/O) expander for the two-line bidirectional bus (I²C) is designed for 2.5-V to 6-V V_{CC} operation.

The PCF8574 device provides general-purpose remote I/O expansion for most microcontroller families by way of the I²C interface [serial clock (SCL), serial data (SDA)].

The device features an 8-bit quasi-bidirectional I/O port (P0–P7), including latched outputs with high-current drive capability for directly driving LEDs. Each quasi-bidirectional I/O can be used as an input or output without the use of a data-direction control signal. At power on, the I/Os are high. In this mode, only a current source to V_{CC} is active.

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE (PIN)	BODY SIZE (NOM)
PCF8574	TVSOP (20)	5.00 mm × 4.40 mm
	SOIC (16)	10.30 mm × 7.50 mm
	PDIP (16)	19.30 mm × 6.35 mm
	TSSOP (20)	6.50 mm × 4.40 mm
	QFN (16)	3.00 mm × 3.00 mm
	VQFN (20)	4.50 mm × 3.50 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

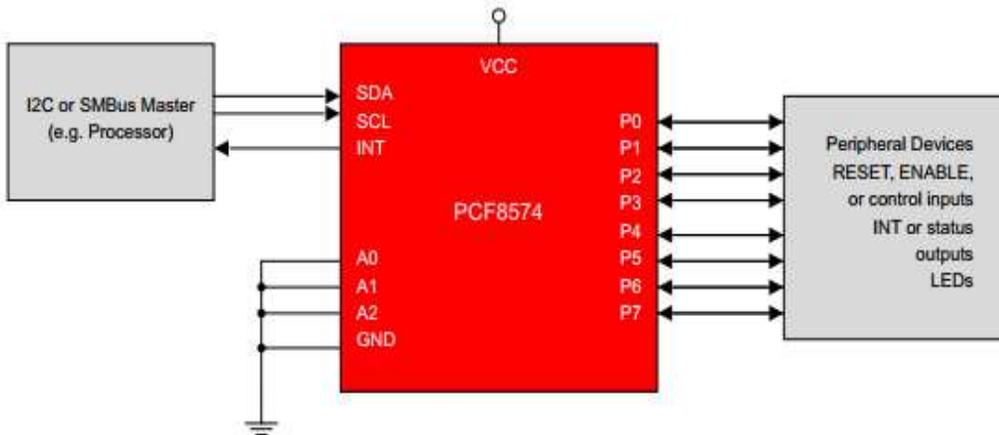
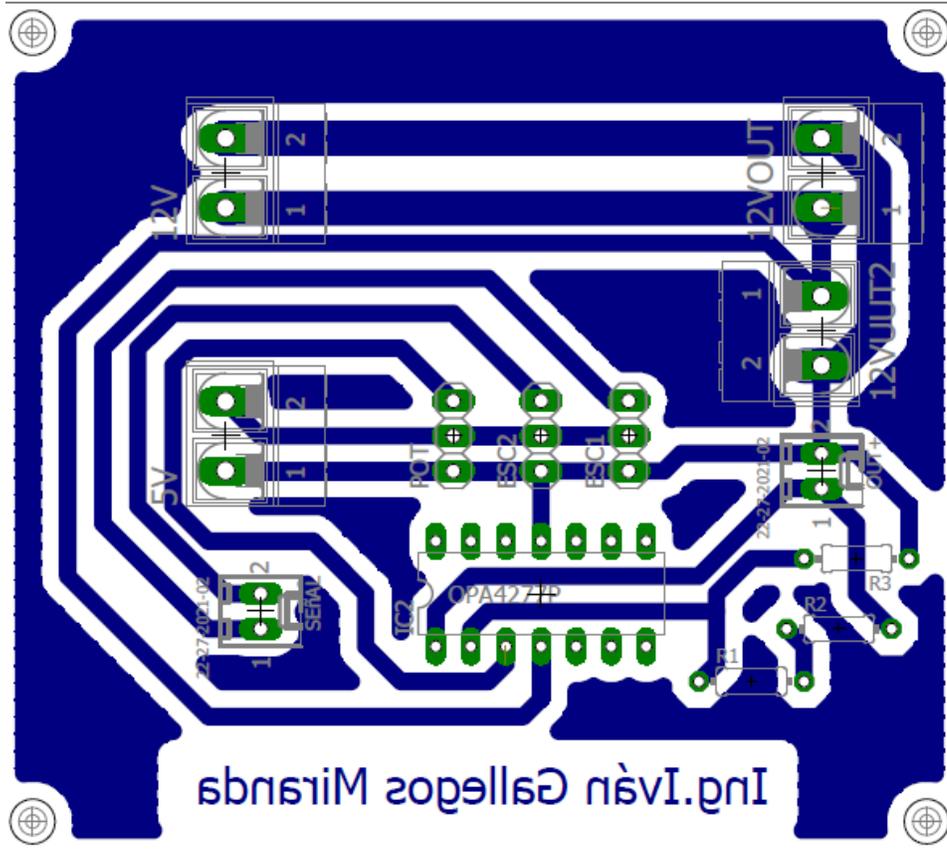


Diagrama PCB de Circuito Electrónico



Código fuente de la programación en Arduino

```
#include<Servo.h>

#include <Wire.h>

#include <LiquidCrystal_I2C.h>

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);

Servo myservo1;

Servo myservo2;

int out = 0;

byte in = 0;

byte inm2 = 0;

byte inm1 = 0;

void setup() {

    // Inicializar el LCD

    lcd.init();

    lcd.backlight();

    lcd.print("Sistema de control");

    myservo1.attach(9);//pin para control al ESC1

    arm1();//usamos la función creada para armar el esc

    myservo2.attach(10);//pin para control al ESC2

    arm2();//usamos la función creada para armar el esc

    // inicializar puerto serie

    Serial.begin(9600);

}
```

```

void loop() {

  // leer del pin A0

  out = analogRead(A0);

  // escalar para obtener formato uint8

  out = map(out, 0, 1023, 0, 255); //la aescala del motor esta limitada a 100

  // enviar en base 10 en ASCII

  Serial.write(out);

  // leer del serie si hay datos

  if (Serial.available()) {

    in = Serial.read();

    inm1 = map(in, 0, 1023, 50, 110);

    // escribir en el pin 10

    myservo1.write(inm1-2);

    //escribir en el pin 11

    inm2 = 123 - inm1;

    myservo2.write(inm2);

    // Ubicamos el cursor en la primera posición(columna:0) de la segunda línea(fila:1)

    lcd.setCursor(1, 1);

    lcd.print("M1= ");

    lcd.print(inm1);

    delay(100);

    lcd.setCursor(1, 2);

    lcd.print("M2= ");

```

```
    lcd.print(inm2-10);  
  
    delay(100);  
  
    }  
  
    // esperar para estabilizar el conversor  
  
    delay(20);  
  
    }  
  
void arm1() {  
  
    myservo1.write(0);  
  
    delay(1000);  
  
    myservo1.write(30);  
  
    delay(3000);  
  
    }  
  
void arm2() {  
  
    myservo2.write(00);  
  
    delay(1000);  
  
    myservo2.write(30);  
  
    delay(3000);  
  
    }
```