

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04- 14

# MÓDULO DIDÁCTICO DE CONTROL DE POSICIÓN DE UN BALANCÍN EÓLICO

Estivet Alejandro Giraldo Quintero

Sebastián Herrera Gil

Ingeniería Mecatrónica

Director del trabajo de grado

**Wimar Alberto Moreno Silva**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO**

**20 de abril del 2018**

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

## RESUMEN

---

Este proyecto de grado que es desarrollado por la modalidad de producto de laboratorio ha sido realizado con la intención de dar a conocer de una manera práctica a los alumnos del ITM, los conceptos de la teoría de control en la carrera de ingeniería mecatrónica.

El control de posición de un balancín eólico requiere de una entrada al sistema que esté tomando datos en tiempo real acerca de la posición donde se encuentra, posteriormente estos datos son comparados con la posición a la cual desea llevarlo el usuario y luego son procesados por un controlador PID para corregir la diferencia (el error) que hay entre la posición actual y la que desea el usuario. En la función de transferencia se tuvo en cuenta el momento de inercia de la barra, el coeficiente de fricción del rodamiento del eje y las fuerzas que actúan sobre el sistema.

Utilizamos la aplicación PID tuner del software de modelamiento matemático MATLAB para adquirir las constantes del controlador pero no fueron lo suficientemente precisas por lo que decidimos emplear el método de tanteo en el que se obtuvieron unas constantes mucho más acertadas.

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

## RECONOCIMIENTOS

Agradecemos a toda la institución ITM en general, que con su gran conjunto de profesores, laboratorios, información física y virtual apoyaron de una manera incondicional nuestros deseos de adquirir conocimiento ingenieril de alta calidad para formarnos como excelentes profesionales y para que tuviéramos suficientes herramientas para enfrentarnos a la vida.

También vale la pena reconocer el apoyo y la compañía que todos nuestros compañeros nos brindaron durante años en nuestro proceso formativo facilitándonos información y asesoría en diversos temas de diferentes áreas que a veces no se comprenden de una manera fácil.

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

## ACRÓNIMOS

---

Estos son los acrónimos encontrados a lo largo de este trabajo.

**Simulink:** Es una aplicación que integra el software MATLAB para programar de una manera más gráfica por medio de bloques.

**Brushless:** Hace referencia a un motor trifásico sin escobillas.

**PID:** Se refiere a un controlador proporcional, integral y derivativo.

**Función de transferencia:** modelo matemático que a través de un cociente relaciona la respuesta de un sistema (modelada) con una señal de entrada o excitación (también modelada).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	7
1.1	Generalidades.....	7
1.2	Objetivo general.....	8
1.2.1	Objetivos específicos.....	8
1.3	Organización del trabajo.....	8
2.	MARCO TEÓRICO.....	9
2.1	Sistemas Motor Hélice Balancín.....	9
2.2	Potenciómetro.....	10
2.3	Motor brushless.....	11
2.4	Variador electrónico ESC.....	12
2.5	Arduino MEGA 2560.....	13
2.7	Interruptor de tres posiciones.....	15
2.8	Fuente de Voltaje.....	15
3.	METODOLOGÍA.....	16
3.1	Método de construcción del sistema.....	17
3.1.1	Sensores y actuadores del sistema.....	17
3.2.	Adquisición de datos.....	19
3.2.1	Lazo abierto.....	19
3.2.2	Método computacional PID tunner (lazo cerrado).....	20
3.2.3	Método por prueba y error (Tanteo).....	22

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

3.3	Compensación de ganancias del controlador.....	24
3.4	Interfaz de usuario.....	24
4.	RESULTADOS.....	25
4.1	Función de Transferencia .....	25
4.2	Linealización en Velocidad (pwm).....	27
4.3	Linealización en posición (ángulo).....	28
4.4	Tabla y gráfica de las relaciones lineales.....	29
5.	CONCLUSIONES.....	31
6.	REFERENCIAS.....	32

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 Generalidades

La idea de llevar a cabo este trabajo de grado parte de la necesidad que se presenta en nuestra institución de tener módulos didácticos en el laboratorio para que los alumnos puedan tener más claridad en los conceptos del área de sistemas automáticos de control, por tal razón el proyecto que aquí se expone está diseñado para que el estudiante lo opere fácilmente.

El módulo está compuesto por una barra que tiene un eje en uno de sus extremos y a su vez un potenciómetro para sensar la posición en la que se encuentra y de esta forma poder realizar el proceso de control mediante un sistema de bloques elaborado en la aplicación Simulink del software MATLAB, desde donde se enviará la salida para controlar el motor mediante un variador de velocidad que es controlado por anchos de pulso. La función de transferencia es obtenida a partir de todas las fuerzas que intervienen en el sistema para luego adquirir las constantes del controlador por el método de prueba y error (tanteo).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

## **1.2 Objetivo general**

Desarrollar un módulo de control de posición que permita aplicar los conocimientos de la teoría de control.

### **1.2.1 Objetivos específicos**

- Diseñar un controlador PID para el módulo de control de posición.
- Realizar mediante bloques del programa simulink una interfaz para el usuario donde se pueda fácilmente manipular y observar los parámetros del sistema como el SetPoint, las constantes del controlador, la señal de salida, el error, etc.
- Elaborar un manual de usuario para indicar el manejo del módulo y las precauciones que se deben tener al operar el sistema.
- Diseñar tres guías de laboratorio para los estudiantes

## **1.3 Organización del trabajo**

Para la elaboración de este trabajo se dispone de 5 secciones, en la primera se habla de la introducción, de los objetivos específicos, la organización del trabajo y todo lo que llevo a cabo durante el proceso, en la segunda parte se presenta el marco teórico donde se dan a conocer los conceptos de potenciómetro, motor brushless y otros, la tercera sección muestra la metodología usada en la elaboración del proyecto como lo es la adquisición de datos, los métodos para generar las constantes del controlador y la interfaz gráfica.

La cuarta parte expone los resultados obtenidos presentando en ella la función de transferencia. La quinta parte da a conocer las conclusiones y por último en la sexta parte se tienen las referencias.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

## 2. MARCO TEÓRICO

---

### 2.1 Sistemas Motor Hélice Balancín

Un sistema motor-hélice-balancín consiste en una barra que tiene como grado de libertad el giro alrededor de un eje horizontal, con un movimiento contenido en el plano vertical. El movimiento lo produce la fuerza de empuje que origina el giro de una hélice, acoplada a un motor, que se encuentra en el extremo de la barra. La variación de la velocidad de giro de la hélice permite controlar la fuerza de empuje de la misma, consiguiendo así mover la barra hacia una posición determinada. Dicha posición se determina a través de la medida del ángulo que forma la barra respecto de la vertical. (Cordero Mallado, 2016)

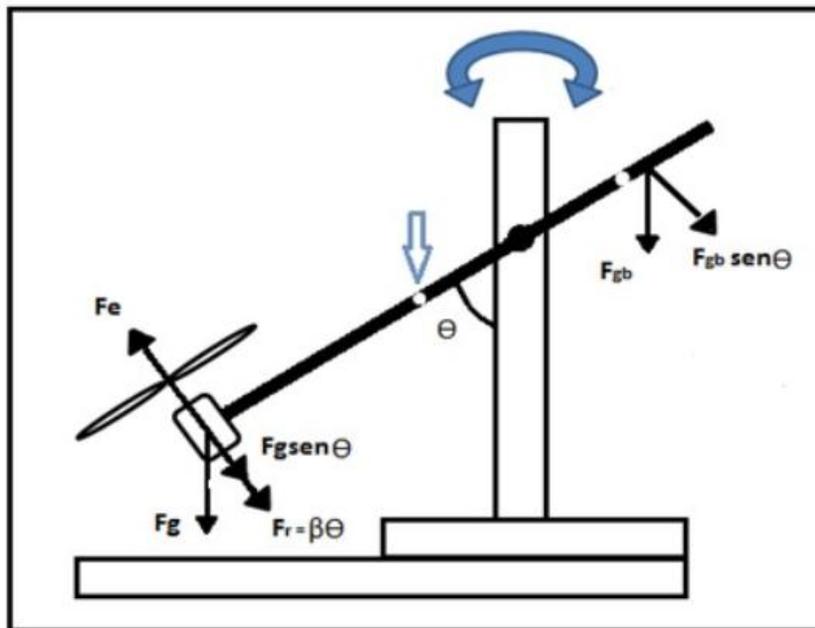


Figura 1 – Boceto esquemático de la planta. Tomado de: Elaboración propia.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

## 2.2 Potenciómetro

Es un dispositivo electrónico compuesto por una resistencia variable en la que se puede cambiar su valor de forma manual. El valor de la resistencia irá variando en función de la posición del potenciómetro.

Dispone de tres terminales: A, B y C. Los terminales A y C se conectan a una fuente de tensión (terminales positivo y neutro) mientras que el tercer terminal B está conectado a una resistencia. El terminal B es el que controla el usuario y le permite ajustar la posición del mismo a lo largo de la resistencia, proporcionando una tensión variable en función del valor de la resistencia. (Cordero Mallado, 2016).

Hay varios tipos de potenciómetros en función de su forma y método de variación de la resistencia, entre ellos están:

### 2.2.1 Potenciómetros deslizantes

La resistencia está formada por una pista resistiva recta, por lo que el cursor para variar su valor también.

### 2.2.2 Potenciómetros rotatorios

La resistencia en este caso es una pista resistiva circular, siendo el cursor un eje que varía el valor de la resistencia al girar.

También se diferencian según la ley de variación de la resistencia, pudiendo ser lineal, logarítmica o senoidal.

En definitiva, un sensor potenciómetro es una resistencia variable que aporta una señal analógica variable, capaz de ser medida y obtener así una relación directa de su posición, que en el caso del potenciómetro giratorio es el ángulo de giro de su eje.

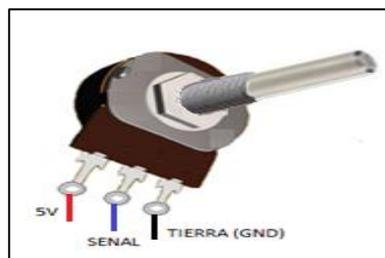


Figura 2 – Potenciómetro lineal (tipo b). Tomado de: Elaboración propia.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

## 2.3 Motor brushless

### 2.3.1 Características

Motor eléctrico de corriente continua sin escobillas, no utiliza escobillas para el cambio de polaridad, sino que emplea un circuito electrónico externo conocido como variador electrónico de velocidad. En este tipo de motores, los imanes permanentes se encuentran en la parte móvil o rotor, mientras que el bobinado se encuentra en la parte fija o estator, justo al contrario a como ocurre en los motores de corriente continua con escobillas. El hecho de no usar escobillas hace que no sea necesario el rozamiento entre el rotor y la parte fija del motor, de tal forma que aumenta la eficiencia ya que se produce menor pérdida de calor, aumentando con ello el rendimiento con un menor consumo de potencia, y permite un rango de velocidad elevado al no tener limitaciones mecánicas. (Cordero Mallado, 2016)

### 2.3.2 Estructura y componentes

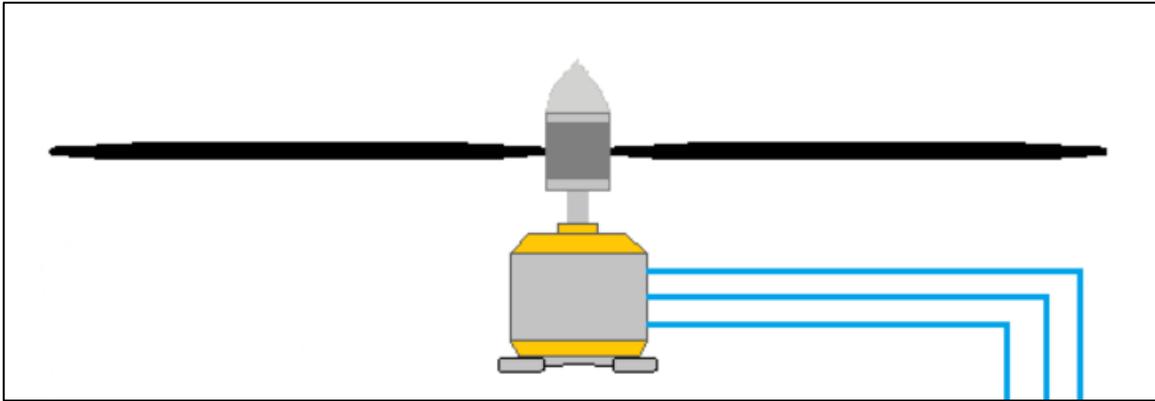
Principalmente, están compuestos por dos partes diferenciadas, la parte móvil que gira, conocida como rotor, compuesta por imanes permanentes, y una parte fija, denominada estator, donde se encuentran las bobinas de hilo conductor por el que circula la electricidad. Dependiendo de la posición relativa entre estator y rotor puede haber dos tipos de motores brushless: inrunner o outrunner. En los outrunner la parte que gira es la parte exterior del motor, la cual porta los imanes permanentes, y es en la zona interior donde se encuentran las bobinas conductoras fijas formando el estator. En el caso de los inrunner ocurre al contrario, el bobinado fijo se encuentra en la parte externa del motor rodeando al rotor, que se encuentra en la parte interna junto con los imanes. (Cordero Mallado, 2016)

### 2.3.3 Funcionamiento

El funcionamiento del motor brushless se basa en que la corriente eléctrica que pasa por el bobinado del estator genera un campo magnético que interacciona con el campo magnético de los imanes permanentes del rotor, y con ello se produce el movimiento de giro de éste. El bobinado está formado por tres bobinas colocadas en un desfase en la posición de 120°. La corriente eléctrica que le llega al motor procede del variador electrónico de velocidad y le llega a través de tres cables que conectan con las tres bobinas, de tal forma que se aplica tensiones en cada bobina con polaridades desfasadas 120° de forma secuencial, haciendo girar el motor a la velocidad que genera el variador. Es decir, el ESC aplica voltajes secuencialmente sobre las bobinas y los imanes del rotor siguen el campo magnético que generan las bobinas. La velocidad de la secuencia se denomina frecuencia y se mide en Hz,

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

de tal forma que a mayor frecuencia, mayor velocidad de giro del rotor. (Cordero Mallado, 2016).



*Figura 3 – Motor brushless. Tomado de: Elaboración propia.*

## 2.4 Variador electrónico ESC

Transforma la corriente continua en una tensión alterna y es el encargado de aplicar al motor la señal necesaria para ajustar la velocidad del motor.

Cuenta con 7 conexiones:

- Tres cables de salida que van conectados directamente al motor y son los que le proporcionan la señal de control
- Dos cables de alimentación usados para conectar la fuente de alimentación
- Un cable de señal de información por donde recibe la señal PWM de control de velocidad del motor
- Un cable para la toma de tierra.

La señal que debe recibir el ESC para que se produzca movimiento del motor se caracteriza por tener un pulso de duración que puede variar entre 1 y 2 milisegundos y una amplitud de 0 a 5 Voltios. La variación de la longitud del ancho de pulso dentro de este rango es lo que controla la velocidad del motor, transmitiéndole más o menos potencia.

Cuando la duración del ancho de pulso es menor o igual a 1ms el motor permanece inmóvil ya que corresponde a la velocidad mínima del motor, y conforme aumenta la duración del pulso aumenta la velocidad de giro del motor, hasta un máximo cuando alcanza los 2ms. Esta señal PWM la genera la placa de Arduino. (Cordero Mallado, 2016)

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

### 2.4.1 PWM (modulación por ancho de pulso)

Técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal. El ciclo de trabajo es la relación que existe entre el tiempo en que la señal se encuentra en estado activo y el periodo de la misma. Su valor se encuentra comprendido entre 0 y 5, y viene dado por la siguiente expresión:

Recordar que esta señal es la que recibe el ESC y no el motor. La señal de potencia que recibe el motor tiene unas características diferentes y dependerá de la señal PWM y del voltaje de la fuente de alimentación.

En definitiva, el variador o ESC es el dispositivo electrónico que se encarga de suministrar la señal de potencia necesaria al motor en función de la señal PWM recibida y de la potencia que le suministra la fuente de alimentación, haciendo que éste gire con mayor o menor velocidad. (Cordero Mallado, 2016)

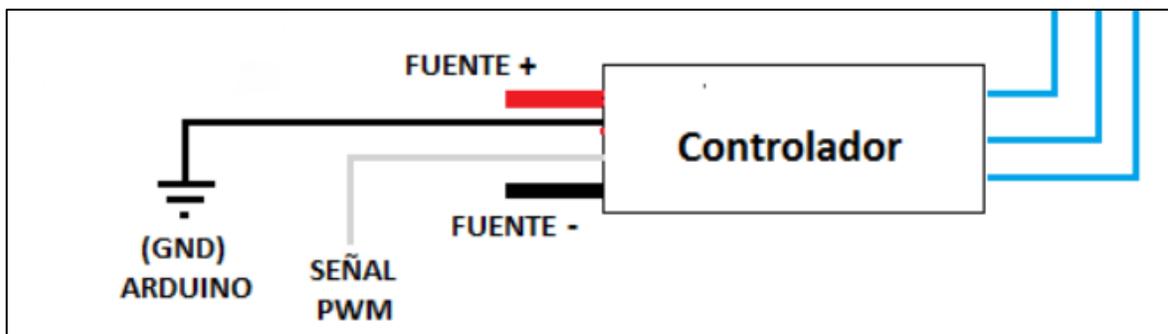


Figura 4 –Controlador de velocidad (ESC). Tomado de: Elaboración propia.

### 2.5 Arduino MEGA 2560

Consta de 54 pines que puede configurarse como entrada o salida digital de entre 0 y 5V (de los cuales se pueden usar 6 como salida PWM), y 16 pines de entrada analógica, entre otros. También cuenta con conexión USB, conexión de alimentación y un botón de reset.

Se ha escogido la placa Arduino Mega 2560 principalmente por los siguientes motivos:

- Dispone de pines de salida de señal PWM, que es el tipo de señal de control que se necesita enviar al ESC para controlar el motor.
- Es capaz de recibir señales analógicas, lo que permite medir el valor que proporciona el potenciómetro.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

- Permite utilizar el programa Simulink en *modo external*. Este es el motivo principal por el que se ha escogido el modelo Arduino Mega, ya que no todos los modelos de placas de Arduino lo permiten. (Cordero Mallado, 2016)

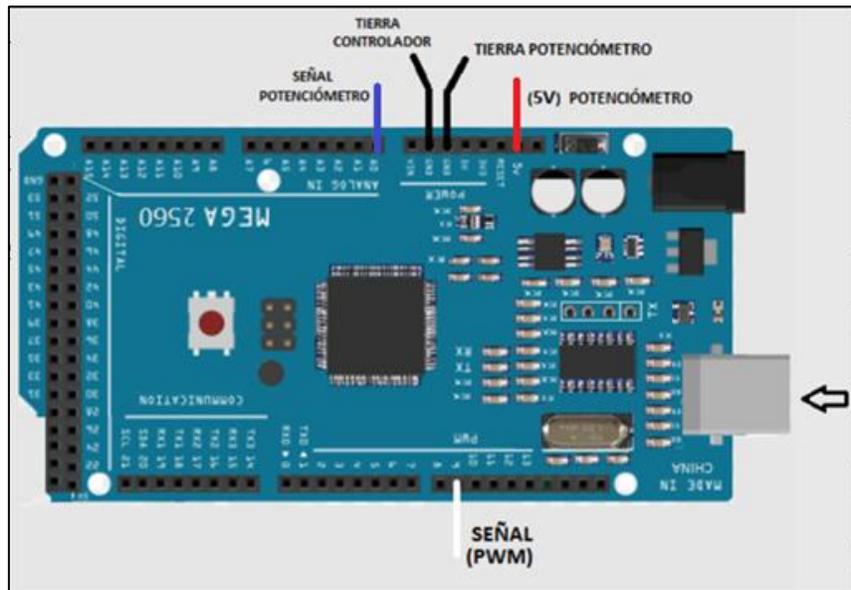


Figura 5 –Tarjeta de desarrollo Arduino Mega 2560. Tomado de: Elaboración propia.

### 2.5.1 Modelo de envío de señal PWM: Control del motor

El **PWM** que debe recibir el **ESC** para hacer girar el motor debe estar comprendido entre 0 y 255. Es decir, el bloque PWM necesita una señal de entrada con valor entre 0 y 255 donde 0 corresponde a un ciclo de trabajo de 0% y 255 a un ciclo de trabajo del 100%. El porqué de que el valor máximo sea 255 es porque al Arduino se le transmite 1 byte (8 bits), cuyo valor máximo en decimal es 255. (Cordero Mallado, 2016)

### 2.6 Modelo de recepción de datos del potenciómetro giratorio

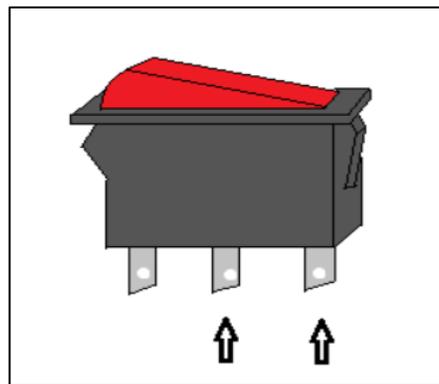
El potenciómetro aporta una señal analógica por uno de sus terminales cuyo valor varía según la posición del potenciómetro. El valor de esta señal analógica puede ser medido desde uno de los pines de entrada analógica de la placa Arduino. Para ello se ha de configurar el pin correspondiente como entrada y visualizar el valor. (Cordero Mallado, 2016)

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

## 2.7 Interruptor de tres posiciones

Un interruptor de tres vías no es más que un dispositivo que sirve para realizar conmutaciones o acciones de apagar y encender.

Combinado con otro de igual tipo puede controlar un elemento eléctrico desde dos posiciones; un pasillo largo, una escalera u otras locaciones. El nombre que reciben esos interruptores es el de interruptor de simple polo doble tiro cuya abreviatura para uso eléctrico es SPDT y en inglés se describe como 3-way. (Osvaldo Victores, 2016)



*Figura 6 –Interruptor de tres posiciones. Tomado de: Elaboración propia.*

## 2.8 Fuente de Voltaje

En general, una fuente de poder es una fuente de energía, esta energía puede ser de varios tipos, energía térmica, atómica, eléctrica, Etc. En el medio de la electrónica, la mayoría de la gente llama fuente de poder a un circuito eléctrico que convierte la electricidad de un voltaje de corriente alterna (Vac en inglés) a un voltaje de corriente directa (Vcd o Vdc en inglés).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

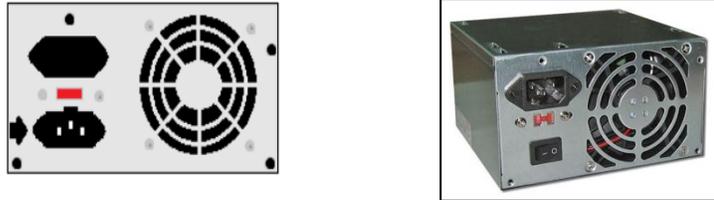


Figura 7 –Fuente de voltaje. Tomado de: <https://sites.google.com/a/inemcali.com/tecnico-en-sistemas/periodo-3/10---fuente-de-voltaje>.

### 3. METODOLOGÍA

Este producto se diseñó a partir de una estructura metálica que va anclada a una base de madera, en la parte superior está el rodamiento unido al potenciómetro que toma la muestra de la posición en que está situada la barra o balancín.

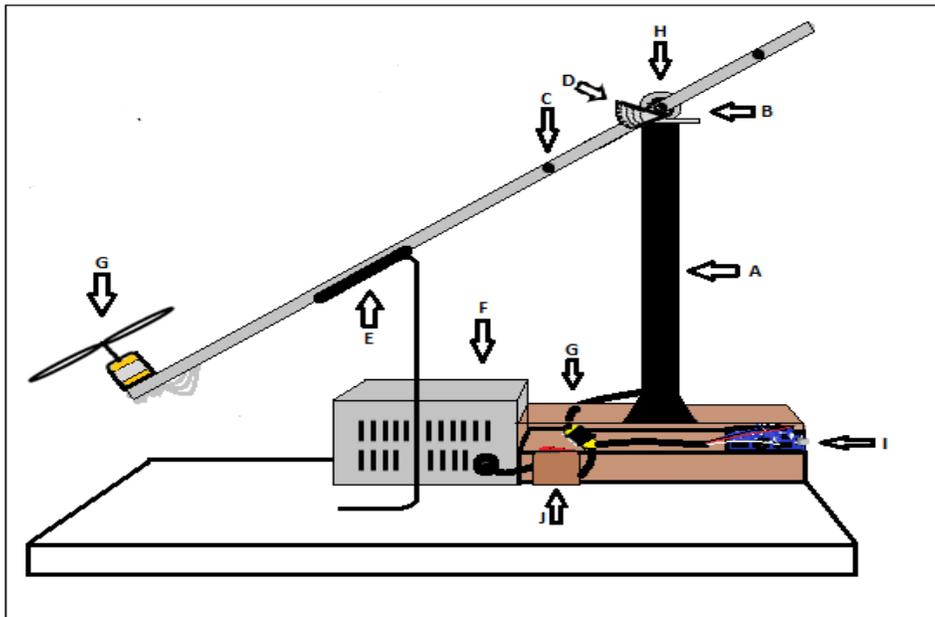


Figura 8 - Planta. Tomado de: Elaboración propia.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

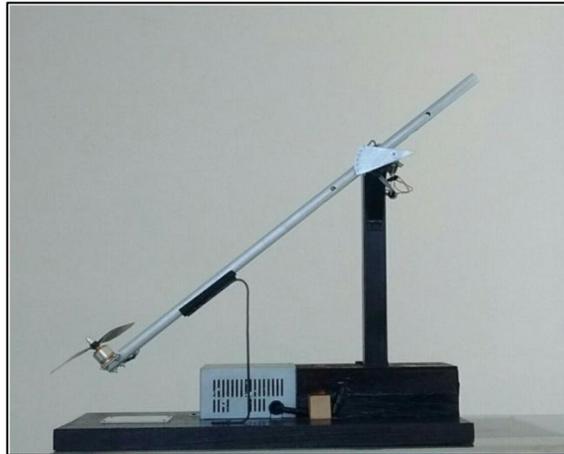
### 3.1 Método de construcción del sistema

Antes de proceder con la construcción física del sistema se realizó un diseño previo donde se analizaron las mejores ubicaciones para el potenciómetro, el soporte para el eje de la barra, el controlador y la fuente con el fin de diseñar de la mejor manera posible el módulo para que el control fuera mucho más preciso.

Luego de este diseño se procedió con un ligero análisis de costos para la compra de materiales y empezar con la manufactura del sistema físico.

#### 3.1.1 Sensores y actuadores del sistema

En este proyecto se utilizó un solo actuador y un solo sensor de acuerdo con la relación entre costo precisión y rango de operación.



*Figura 9 – Planta física construida. Tomado de: Elaboración propia.*

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14



*Figura 10* – Motor brushless A2212 13t. Tomado de: <http://www.modeltronic.es/motor-a2212-1000kv-para-dron-f450-f550-con-accesorios-p-10216.html>



*Figura 11*- Potenciómetro lineal de precisión. Tomado de: <https://www.digikey.com/product-detail/es/precision-electronics-corporation/KU5021S28-HL/KU5021S28-HL-ND/523423>

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

Elemento	Descripción
<b>Potenciómetro lineal tipo B</b>	Salida análoga Potencia: 2w Resistencia: 5k Tolerancia +-10% Rotación: 314° Longitud de accionador: 0.875" (22.23 mm) Diámetro del actuador: 0.249" (6.32 mm) Rosca de buje: 3/8-32
<b>Motor brushless</b>	Referencia: A2212 13t KV: 1000 Max Eficiencia: 80% Tamaño hélice: 10x4.5 o 11x4.7 Eficiencia Máx. Amperios: 4-10A (> 75%) Capacidad actual: 12A / 60 No Corriente de carga @ 10V: 0.5A N° de celdas: 2-3 Li-LIPO Dimensiones Motor: Φ27.5 x 30 mm Diámetro del eje: Φ3.17mm Peso: 63g. Longitud de la hélice: 20cm.

Tabla 1. Características del sensor y actuador.

### 3.2. Adquisición de datos

#### 3.2.1 lazo abierto

La aplicación en lazo abierto nos sirve para saber cómo responde el sistema a diferentes entradas. Al no poseer realimentación a misma entradas no dará siempre las mismas salidas ya que dependerá en otros aspectos como la posición y entrada anterior.

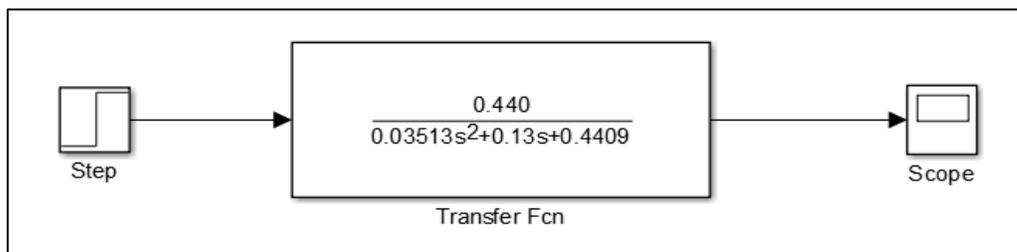


Figura 12- Bloques de control en simulink (función de transferencia y función escalón). Tomado de: Elaboración propia.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

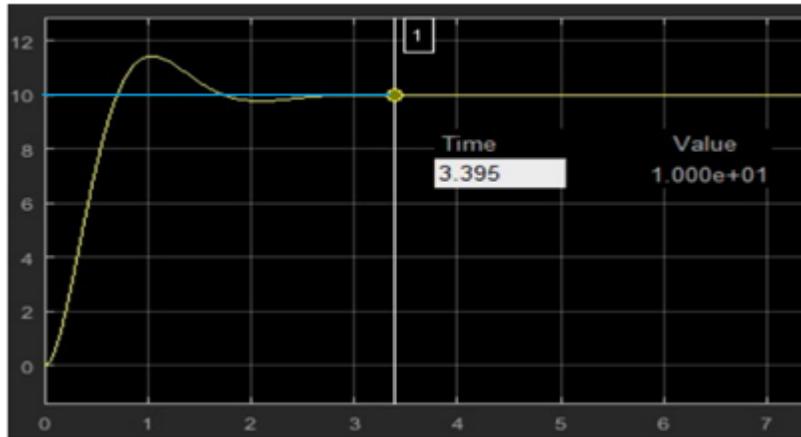


Figura 13- Grafica de estabilización. Tomado de: Elaboración propia mediante Simulink  
(Color azul para la referencia y color amarillo para la salida)

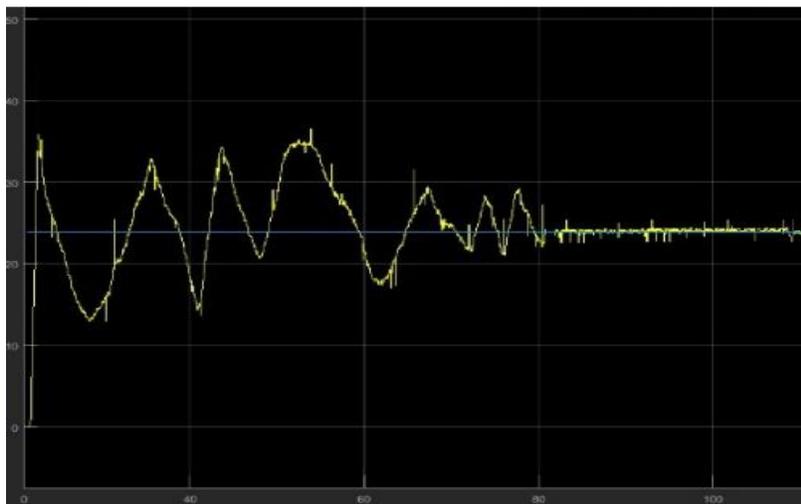


Figura 14- Grafica del comportamiento del sistema real en lazo abierto. Tomado de: Elaboración propia  
(Color azul para la referencia y color amarillo para la salida)

### 3.2.2 Método computacional PID tuner (lazo cerrado)

Este método se puede utilizar siempre y cuando se cuente con la función de transferencia, lo que hace es dar una aproximación de lo que sería el valor ideal las constantes del controlador.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

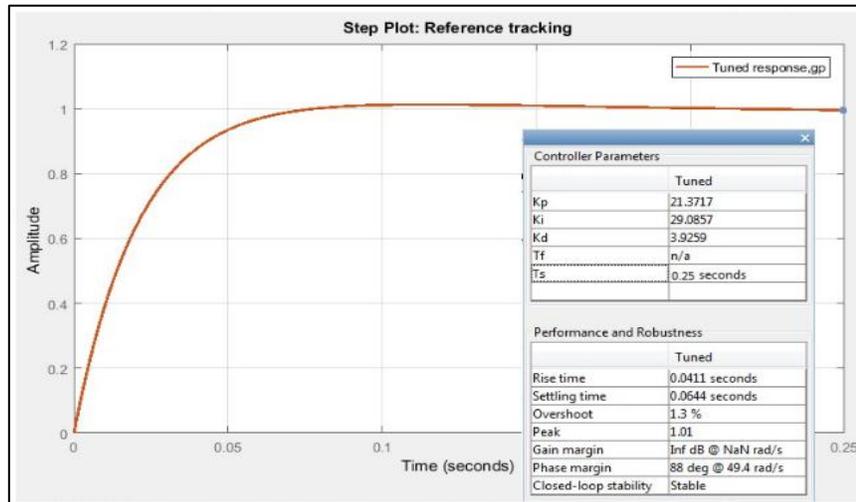


Figura 16- Grafica del PID tuner. Tomado de: Elaboración propia mediante simulink



Figura 15- Grafica PID tuner del sistema real. Tomado de: Elaboración propia (Color azul para la referencia y color amarillo para la salida)

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

### 3.2.3 Método por prueba y error (Tanteo)

Como su nombre lo indica, el método por prueba y error consiste en tunear y ajustar los valores de las constantes del controlador PID mediante prueba y error por observaciones. Es un método tecnológico que consiste en realizar determinadas acciones, comprobar su efecto y volver a realizar las acciones, adecuadamente modificadas, en función del resultado observado:

Para este método se elaboró un sistema de prueba en la interfaz de simulink- Matlab y se siguieron los siguientes pasos para la sintonización por prueba y error.

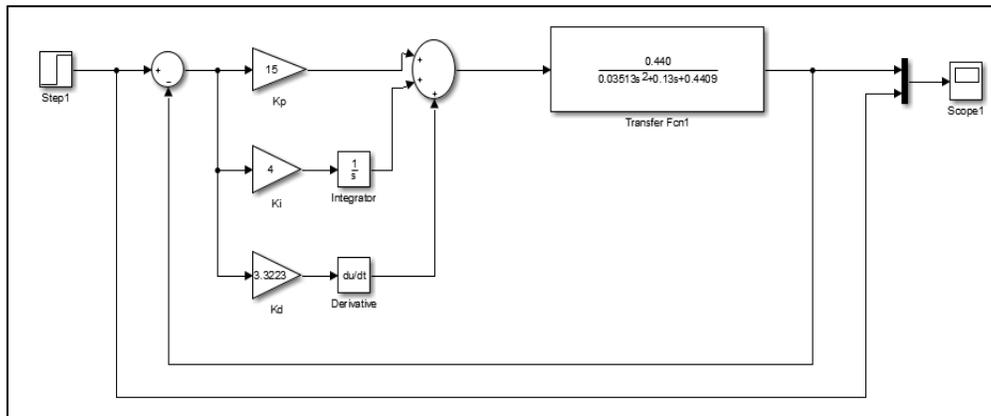


Figura 17-sistema de bloques para efectuar método de prueba y error (tanteo). Tomado de: Elaboración propia

1. Se fijó  $K_i$  y  $K_d$  en un valor de cero y se fue incrementando de a poco el valor de  $K_p$  hasta que se lograran oscilaciones sostenidas, una vez logrado esto se dividió este valor sobre dos ( $K_p/2$ ).
2. Luego se aumentó el valor de  $K_i$  de a poco hasta que lograra igualmente oscilaciones sostenidas y una vez obtenido esto se dividió este valor sobre tres ( $K_i/3$ ).
3. Finalmente se fue aumentando el valor de  $K_d$  de a poco hasta lograr las oscilaciones sostenidas y una vez logrado esto se dividió este valor sobre tres ( $K_d/3$ ).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14



Figura 18- Tiempo de estabilización. Tomado de: Elaboración propia mediante simulink (Color azul para la referencia y color amarillo para la salida)

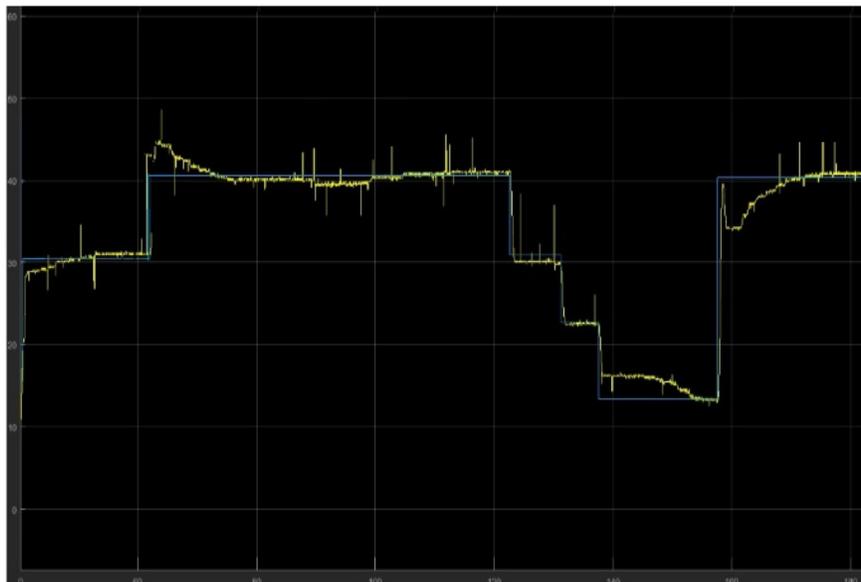


Figura 19- Comportamiento del sistema real. Tomado de: Elaboración propia (Color azul para la referencia y color amarillo para la salida)

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

### 3.3 Compensación de ganancias del controlador

Como los datos acerca de las constantes que genera la aplicación PID tuner son datos ideales resultados de una operación matemática se reajustaron dichas constantes de manera experimental variando de forma directa estas constantes empezando por la constante proporcional para omitir el error de forma más rápida. En la tabla 2 se muestran las constantes luego de realizarles el ajuste experimental.

<i>Constantes del controlador PID</i>	<b>Kp</b>	<b>Ki</b>	<b>Kd</b>
	15	4	3.32

Tabla 2 – Constantes ajustadas del controlador PID. Tomado de: Elaboración propia.

### 3.4 Interfaz de usuario

En el diseño para la interfaz de usuario se utilizó la aplicación simulink del software MATLAB.

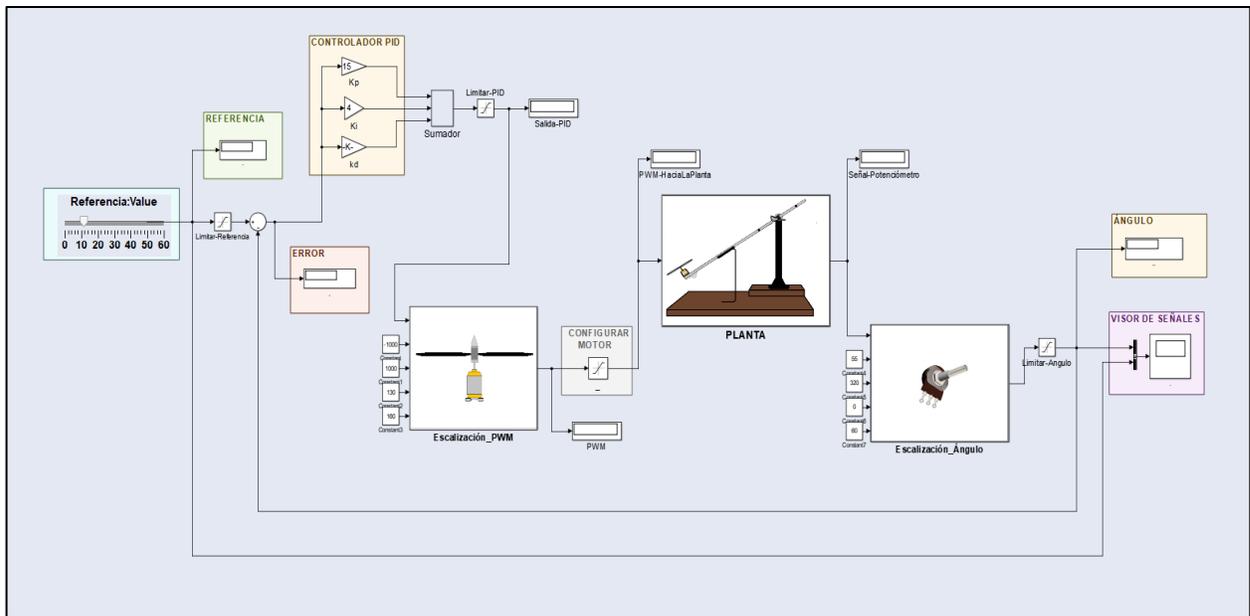


Figura 20 – Interfaz de usuario 1. Tomado de: Elaboración propia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

## 4. RESULTADOS

---

En esta sección se presentan todos los resultados obtenidos después de llevar a cabo la elaboración del módulo para el control del balancín eólico.

### 4.1 Función de Transferencia

A continuación se puede observar el modelo de la barra móvil.

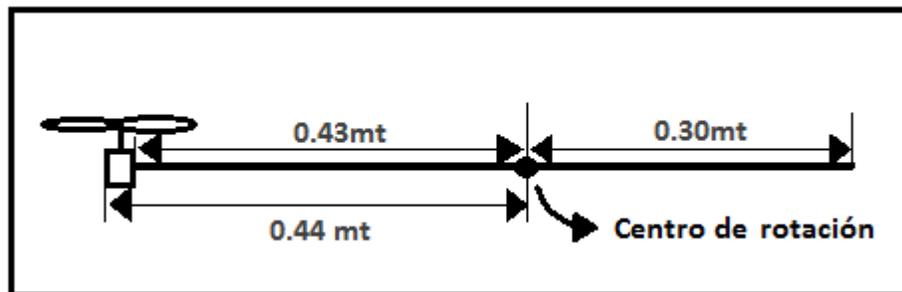


Figura 21 – modelo de la barra móvil. Tomado de: Elaboración propia.

$L = 0.73\text{mts}$  Longitud de la barra

$M_m = 0.092\text{ kg}$  Masa del motor

$M_b = 0.35\text{k}$  Masa de la barra

#### Torques del sistema

$$\tau_b = \int_{0.43}^{0.30} \frac{gM_b}{L} X dx = \int_{0.43}^{0.30} 9.8 \left( \frac{0.356}{0.73} \right) x \text{sen}\theta(t) dx$$

$$\tau_b = -0.2268 \text{sen}\theta(t) \quad \text{Torque barra}$$

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

$$\tau_m = r \times F_{gm} = -0.44 (9.8)(0.092\text{kg})$$

$$\tau_m = -0.3967\text{sen}\theta(t) \quad \text{Torque motor}$$

$$\tau_e = r \times F_{ge} = 0.440F_{ge}\text{Sen}90$$

$$\tau_e = 0.440 F_{ge} \quad \text{Torque fuerza de empuje}$$

### Momento de Inercia del sistema

$$I_b = \int_{-0.43}^{0.30} \frac{Mb}{L} x^2 dx = \int_{-0.43}^{0.30} \frac{0.356}{0.73} x^2 dx$$

$$I_b = 17.314 \cdot 10^{-3} \text{kgm}^2$$

$$I_b = 0.017314 \quad \text{Momento de inercia de la barra}$$

$$I_m = M_m \cdot r^2 = 0.092 \cdot (0.44)^2 = 0.017811$$

$$I_m = 17.811 \cdot 10^{-3} \text{kgm}^2 \quad \text{Momento de inercia del motor}$$

$$I_t = (17.314 + 17.811) \cdot 10^{-3} = 0.03513$$

$$I_t = 3.513 \cdot 10^{-2} \text{kgm}^2 \quad \text{Momento de inercia total}$$

$$\tau_b + \tau_m + \tau_e - B \frac{d\theta}{dt} = \frac{I d^2\theta}{dt^2} \quad \frac{d\theta}{dt} = \theta' = \omega \quad \frac{d^2\theta}{dt^2} = \theta'' = \alpha$$

$$-0.2268\text{sen}\theta(t) - 0.3967\text{sen}\theta(t) + 0.440F_{ge} - B\theta' = 0.03513 \theta''$$

$$-0.6535 \text{sen}\theta(t) + 0.440 F_{ge} - B\theta' = 0.03513 \theta''$$

$$0.440 F_{ge} = 0.6235 \text{sen}\theta(t) + B\theta' + 0.03513 \theta''$$

$$\text{Condiciones de frontera: } (\theta' = 0 ; \theta'' = 0; \theta = 45)$$

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

$$f = 0.440F_{ge} - 0.3235 \sin\theta(t) - B\theta' - 0.03513\theta'$$

$$\Delta f = \frac{\partial f}{\partial \theta''} \Delta \theta'' + \frac{\partial f}{\partial \theta'} \Delta \theta' + \frac{\partial f}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial f}{\partial F_{ge}} \Delta F_{ge} = 0$$

$$\Delta f = 0.440 \Delta F_{ge} - 0.6235 \cos 45 \Delta \theta - B \Delta \theta' - 0.03513 \Delta \theta''$$

$$0.440 \Delta F_{ge} = 0.03513 \Delta \theta'' + B \Delta \theta' + 0.4409 \Delta \theta$$

$$0.440 \Delta F_{ge}(s) = 0.03513s^2 + Bs\Delta\theta(s) + 0.4409\Delta\theta(s)$$

B=0.13 → rozamiento de los rodamientos y el potenciómetro

$$\frac{\Delta \theta (s)}{\Delta F_{ge}(s)} = \frac{0.440}{0.03513s^2 + Bs + 0.4409}$$

#### 4.2 Linealización en Velocidad (pwm)

Encontrar de forma directa la relación entre el valor de señal de control y valor en PWM de la forma  $PWM = f(\text{señal\_control})$ . Para ello basta con resolver una ecuación lineal de la forma  $y = Ax + B$ , donde la variable dependiente 'y' sea la velocidad en PWM y la variable independiente 'x' el valor de la señal de control que proporciona el controlador PID. Las constantes A y B se obtienen de forma experimental midiendo las variables x e y en dos puntos diferentes.

Para esto se utilizó un bloque en el cual internamente se realiza la linealización para la velocidad del sistema en PWM. A continuación se puede observar tanto externa como internamente este bloque. (Cordero Mallado, 2016).

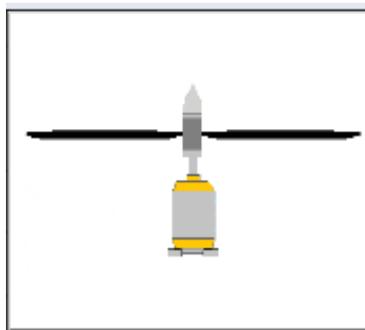


Figura 22 –Bloque de Linealización de velocidad externo. Tomado de: Elaboración propia.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

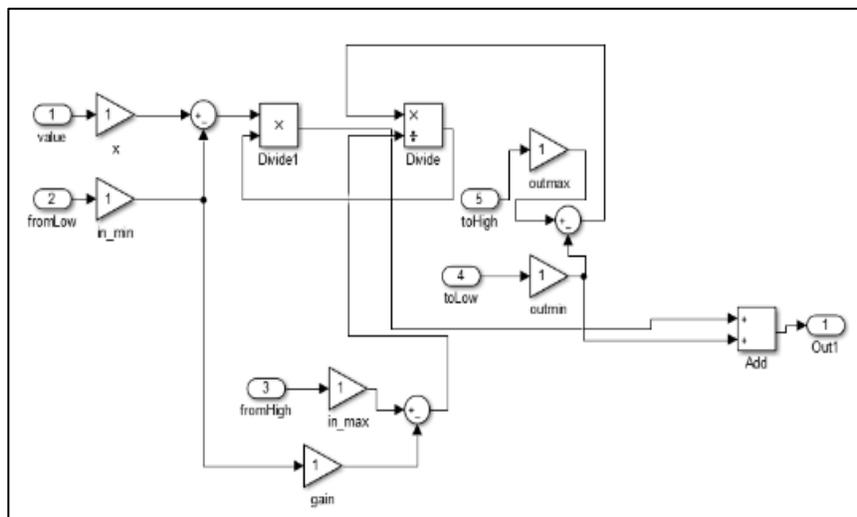


Figura 23 – Bloque de Linealización de velocidad interno. Tomado de: Elaboración propia.

### 4.3 Linealización en posición (ángulo)

El potenciómetro lineal proporciona una señal lineal que varía entre dos valores, máximo y mínimo. Sabiendo esto se puede encontrar de forma directa la relación entre el valor de señal analógica y valor en ángulos de la forma  $\text{Ángulo} = f(\text{señal\_analog})$ . Para ello basta con resolver una ecuación lineal de la forma  $y = Ax + B$ , donde la variable dependiente ‘y’ sea el ángulo o posición y la variable independiente ‘x’ el valor de la señal analógica que proporciona el potenciómetro. Las constantes A y B se obtienen de forma experimental midiendo las variables x e y en dos puntos diferentes.

Para esto se utilizó un bloque en el cual internamente se realiza la linealización para la posición en ángulos. A continuación se puede observar tanto externa como internamente este bloque. (Cordero Mallado, 2016).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14



Figura 24 – Bloque de Linealización de posición externo. Tomado de: Elaboración propia

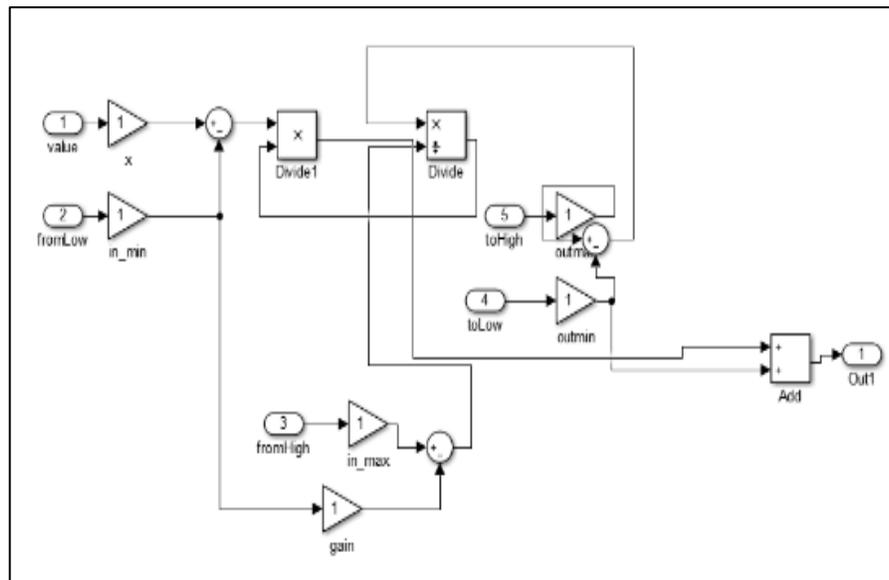


Figura 25 – Bloque de Linealización de posición interno. Tomado de: Elaboración propia

#### 4.4 Tabla y gráfica de las relaciones lineales

A continuación se muestra una tabla con las relaciones lineales obtenidas experimentalmente.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

Ángulo	Dato potenciómetro	PWM
0	45	141.7
5	77	143.1
10	100	144.2
15	121	144.7
20	145	145.5
25	166	145.8
30	188	146
35	210	145.5
40	230	144.8
45	255	144.5
50	275	144.4
55	298	145.5
60	305	148

Tabla 3 – Tabla de Linealización. Tomado de: Elaboración propia.

En la siguiente grafica se ha representado en una toma de muestra de 13 datos, el valor de los grados en un intervalo que va de 0 a 60, para compararlos con el dato digital sensado y el dato que el controlador envía para compensar la velocidad del motor en una señal PWM.

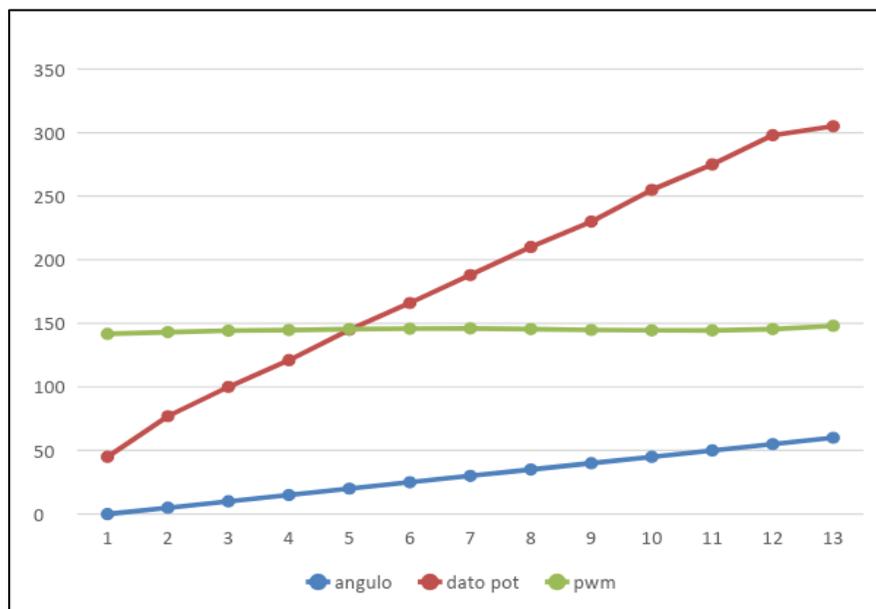


Figura 23 – Comparación de la señal de sensor potenciómetro (En rojo), posición en ángulo (En azul) y velocidad del motor en PWM (En verde) Tomado de: Elaboración propia

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

## 5. CONCLUSIONES

---

1. Se lleva a cabo el control de posición del balancín eólico que permite adquirir los conocimientos de la teoría de control.
  
2. Por medio de la interfaz gráfica, el estudiante puede introducir diferentes datos como por ejemplo el SetPoint y los valores de las constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ .
  
3. En tiempo de ejecución es posible modificar los parámetros de control mediante la interfaz que se implementó en la aplicación simulink.
  
4. Junto con el proyecto se realizaron tres guías de laboratorio y un manual de usuario, lo que permite al estudiante operar de una manera segura el módulo, además de adquirir avanzar considerablemente en su aprendizaje de los conceptos básicos de la teoría de control.
  
5. Los valores de las constantes PID deben ser ajustados de manera manual debido a que los resultados que se obtienen en otros métodos son ideales y no tienen en cuentas todas las posibles variables que están intervienen en un sistema real.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

## REFERENCIAS

---

- Agustín, F. (2013). Obtención de la función de transferencia del sistema mediante la identificación paramétrica a partir de los datos experimentales. Instituto Tecnológico de Mérida.
- Ballesteros, Martín, Carbajo, Ángel Del Río, García Ruiz, Mario. (2013). "CONTROL DE POSICIÓN DE UN BALANCÍN CON ARDUINO". Licenciatura, Universidad de Valladolid.
- Cordero Mallado, Eduardo. (2016). "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA MOTOR-HÉLICE-BALANCÍN". Licenciatura, Universidad de Sevilla.
- Dorf, Richard C., Robert H. Bishop. (2005). Sistemas de control moderno. Editorial Prentice Hall.
- Flores, Agustín. (2013). Obtención de la función de transferencia del sistema mediante la identificación paramétrica a partir de los datos experimentales. Instituto Tecnológico de Mérida.
- French, Anthony Philip. (1974). MECÁNICA NEWTONIANA. Editorial Reverté, S.A.
- Kuo, benjamín C, y José Guillermo Aranda Pérez. (1996). Sistemas de control automático. Editorial Prentice Hall.
- Martínez Benjamín, Joan Josep. (2001). Mecánica Newtoniana. Editorial Ediciones UPC.
- Ogata, Katsuhiko. (1998). Ingeniería de control moderna. Editorial Prentice Hall
- Solé, A. C. (2012). Neumática e hidráulica. Marcombo.
- Viltres La Rosa, Vladimir. (2012). "Control de posición de un balancín con motor y hélice". Licenciatura, Universidad de Valladolid.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2018-04-14

FIRMA ESTUDIANTES \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

FIRMA ASESOR \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

RECHAZADO \_\_\_\_\_      ACEPTADO \_\_\_\_\_      ACEPTADO CON  
 MODIFICACIONES \_\_\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD \_\_\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_