

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

CONTROL DE POSICIÓN DE UN BALANCÍN EÓLICO

Mariana Durango Flórez

Tecnología electrónica

Daniel González Montoya

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

23 de febrero de 2017

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

El siguiente trabajo detallará el proceso de implementación de un control de posición de un sistema de un grado de libertad que consta de una barra de aluminio de diámetro circular a la cual se le añadió en un extremo un contrapeso que ayuda a nivelar la barra y al otro se le acopló un motor con una hélice, cerca de su centro de gravedad tiene un potenciómetro ensamblado dentro de un eje vertical. El conjunto motor-hélice generará la fuerza de empuje adecuada para el funcionamiento del sistema; implementando un control PID mediante las herramientas de simulink, Arduino y un circuito de potencia adecuado, se logra controlar la velocidad de giro del motor y por ende la posición de la barra respecto al eje vertical.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Agradecimientos al personal del laboratorio de electrónica y telecomunicaciones de parque i por su amabilidad y préstamo de instalaciones, elementos y componentes necesarios para completar este proyecto.

De igual manera a mi asesor Daniel González por el acompañamiento, supervisión y orientación proporcionada en todo este proceso.

Agradezco a mi familia por el apoyo y la motivación dada a lo largo de la realización de este proyecto.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

PWM Pulse width modulation (modulación de ancho de pulso)

PID proporcional, integral, derivativo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....
2.	MARCO TEÓRICO.....
3.	METODOLOGÍA
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO
	REFERENCIAS
	APÉNDICE.....

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

Generalidades

El proyecto actual es un modelo que simula el movimiento de un helicóptero; la velocidad de giro del rotor principal del motor permite impulsar el aire de la parte superior a la inferior del rotor y al aumentar la velocidad disminuye la presión y es así como se sostiene la aeronave. El modelo diseñado de balancín-eólico permitirá diseñar una estrategia de control para regular la posición de la barra principal ante cambios de voltaje y perturbaciones en la posición de la hélice, disminuyendo o aumentando la velocidad del motor.

Objetivos

General

- Modelar matemáticamente y encontrar la función de transferencia que describa de manera concreta la planta.
- Diseñar e implementar un controlador que permita que el sistema alcance la referencia con sobre picos leves y obtener el menor tiempo de establecimiento posible.

Específicos

- Diseñar un modelo de balancín eólico utilizando como sensor un potenciómetro logarítmico y la variación de velocidad de un motor DC como elemento final de control.
- Realizar un circuito de potencia que maneje adecuadamente la corriente y el voltaje del sistema.
- Realizar el modelo matemático de la planta teniendo en cuenta todas las variables física involucradas como pesos, longitudes y diámetros.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Hallar la función de transferencia del sistema de manera tanto teórica, con el modelo matemático como experimental, obteniendo la respuesta a un escalón de voltaje.
- Realizar la programación adecuada en arduino y simulink que permita establecer la comunicación serial pertinente así como cambiar el ciclo de trabajo del arduino y así se ingrese la cantidad de voltaje correcta al motor.
- Implementar un controlador PID con el cual el sistema cumpla con las características de diseño deseadas; un tiempo de establecimiento menor a los 10 segundos y una cantidad de sobre picos mínima.

Organización de la tesis

En la primer parte de este proyecto se describen los aspectos teóricos de los dispositivos utilizados, describiendo su funcionamiento, programación y características físicas más relevantes, al igual que la teoría de control y definiciones necesarias para la implementación y diseño del controlador.

En la segunda parte se especifica la metodología utilizada desde las características físicas y modelado matemático, las programaciones realizadas en matlab y arduino hasta los métodos utilizados para la sintonización del controlador PID.

En la tercera parte se presentan los resultados obtenidos y las limitaciones encontradas al implementar el controlador en la planta después de someterla a diferentes cambios en la referencia observando el comportamiento de la señal de control para comprobar que es la respuesta deseada.

En la cuarta parte se encuentran las conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro; en este apartado se señala la verificación del cumplimiento de los objetivos planteados, así como las mejoras y cambios futuros que podrían realizarse para que la planta tenga un funcionamiento más eficiente.

Y por último, en los apéndices se encuentran los programas de arduino y matlab utilizados para el desarrollo del proyecto.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

Arduino

Se trata de una placa con un micro controlador ATmega328 que posee 2KB de memoria RAM, 32KB de memoria flash. Esta placa funciona con 5V de alimentación, posee 6 entradas análogas y 14 conexiones digitales que pueden ser utilizadas como entradas o salidas y de las cuales 6 de ellas están rotuladas con PWM, además está equipada con un oscilador de cuarzo de 16Mhz.

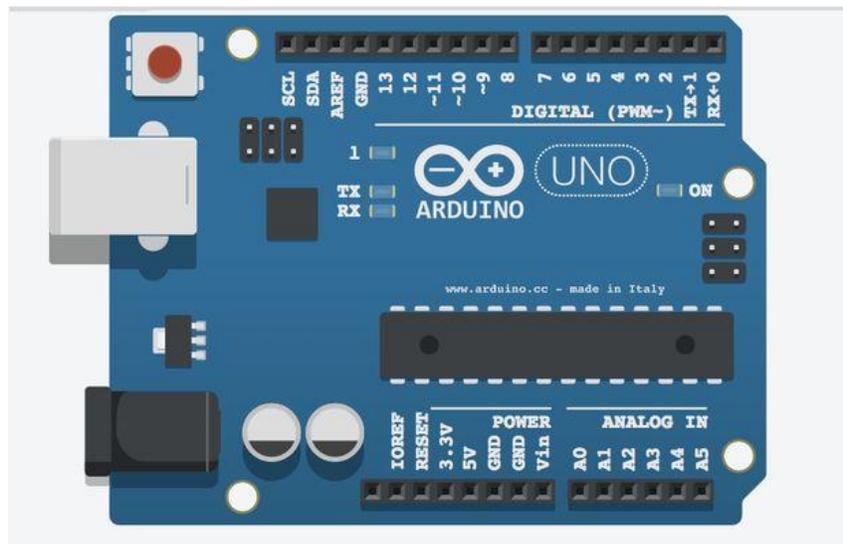


Figura 1. Arduino

Este dispositivo se programa con lenguaje C, este lenguaje permite una mayor comprensión por parte del usuario como de la máquina ya que el entorno de desarrollo arduino utiliza un compilador, es decir, convierte la secuencia de comandos descritos en el sketch o programa en código de máquina que será el que se ejecute en el micro controlador.

El sketch tiene dos partes principales que nunca deben faltar: el *void setup*, donde se escriben las instrucciones que se ejecutan solo una vez o cada vez que se carga un nuevo sketch en el micro controlador, es decir, las respectivas configuraciones e inicializaciones

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

de pines y variables, y el *void loop* que es la parte del programa que se ejecuta cíclicamente, es donde se escribe el núcleo del programa como la activación de salidas y las lecturas de entrada.

Para la conexión arduino+simulink son necesarios los siguientes bloques:

Serial receive: Este bloque configura y abre una interface para especificar direcciones remotas usando el protocolo serial. Dentro de este bloque se debe especificar el puerto serial del cual se recibe información y el tipo de dato que se está leyendo.

Serial send: Este bloque envía datos binarios del modelo al respectivo micro controlador usando el protocolo serial. Dentro de este bloque se debe especificar el puerto serial al que se envía la información.

Serial configuration: En este bloque se configuran los parámetros del puerto serial que se usarán para enviar y recibir información, como también la velocidad a la que se desea la transferencia de datos (en bps). Debe configurarse antes de configurar el serial receive y el serial send.

Driver L298n

Este dispositivo contiene un circuito integrado L298, es un puente H doble que permite controlar 2 motores de corriente continua, diseñado para aceptar lógica TTL estándar y soporta como máximo 50 V y 2 A; el módulo incluye diodos de protección, jumpers de selección para habilitar cada una de las salidas (A y B) y pines de habilitación (ENA y ENB) para los dos motores (A para OUT1 y OUT2, B para OUT3 y OUT4), un regulador de voltaje LM7805 con un jumper de selección que en caso de estar activo el driver permite una alimentación externa de 6V-12V y el pin de 5V marca 5V de tensión el cual puede utilizarse para alimentar el micro controlador que se esté utilizando siempre y cuando la corriente de este no sea mayor a los 500mA, si se desactiva, el driver puede alimentarse con voltajes de 12V hasta 35V DC; en caso de encontrarse desactivado el pin de 5V marcará 0V por lo que es necesario conectar esta entrada a una tensión de 5V.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

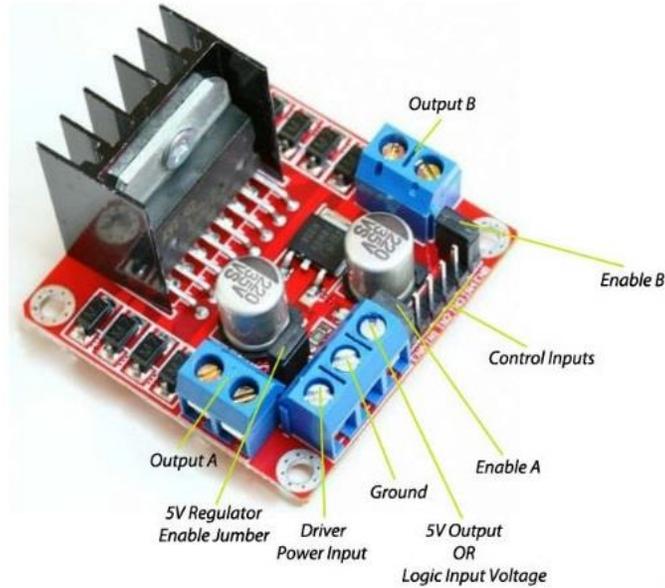


Figura 2. Driver L298N

Control PID

El controlador PID es una combinación de los controladores PI y PD; es un compensador atraso-adelanto. Ya que la acción de control PI ocurre en la región de frecuencias bajas y la acción del control PD en frecuencias altas, el control PID se utiliza en sistemas donde se requieren mejoras tanto en el comportamiento transitorio como en el estado estacionario.

Este tipo de controlador suele abordarse desde el dominio temporal, teniendo en cuenta ciertas especificaciones para el diseño de este; el sobre pico máximo, tiempo de levantamiento y tiempo de establecimiento se definen para una entrada escalón unitario.

Un controlador PD puede añadir amortiguamiento, pero no afecta la respuesta en estado estable, por otro lado, un controlador PI mejora la estabilidad relativa y el error en estado estable, pero incrementa el tiempo de levantamiento, luego, un controlador PID decreta el tiempo de establecimiento, mejora el error en estado estable y decreta los sobre impulsos que se generan en el sistema.

Los controles PID se aplican particularmente, cuando el modelo matemático de la planta no se conoce así que los métodos de diseño analíticos no pueden emplearse. Este tipo de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

esquema de control es de los más utilizados en la industria ya que demuestra aportar un óptimo resultado.

La interfaz simulink tiene un bloque PID (figura 3) el cual se encarga de implementar el controlador en tiempo continuo o discreto. En este bloque se configuran el valor de las ganancias del controlador así como su tipo, PD, PI, PID. La entrada del bloque es generalmente una señal de error, esta señal es la diferencia matemática entre la señal de referencia y la salida del sistema y la salida es la suma, la integral y la derivada compensada de las señales de entrada, es decir, los parámetros proporcional, integral y derivativo.

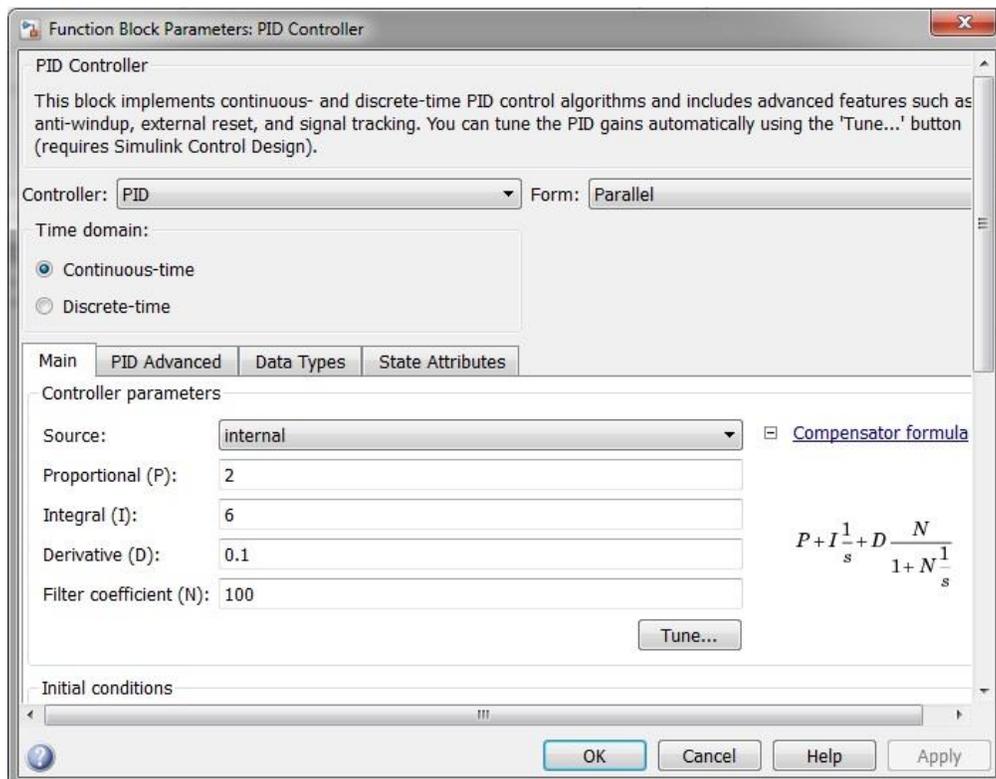


Figura 3. Bloque PID simulink

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

El modelo de la figura 4 muestra la configuración que tiene el sistema; se trata de una barra vertical unida a una barra horizontal móvil; a la barra móvil se le ensambló un potenciómetro logarítmico de $5K\Omega$ el cual se encuentra encajado cerca al centro de gravedad de la barra y cambia su valor según el movimiento de ésta permitiendo así registrar los valores de posición respecto al eje vertical. En uno de los extremos de la barra móvil se encuentra un motor DC de 24V con una hélice de 25.4 cm, en el otro extremo se encuentra un contrapeso utilizado para alinear un poco la barra a causa del peso del motor; este arreglo motor-hélice será el elemento final de control, ya que a cada valor de tensión le corresponde una posición determinada a la barra.



Figura 4. Estructura física

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Fueron necesarias las siguientes variables para obtener el modelo matemático y la función de transferencia; estos datos hacen parte de la descripción física del sistema.

Longitud barra móvil =50cm

Distancia del motor al eje=26 cm

Distancia base al eje (vertical)=32.5cm

Diámetro de hélice=25.4 cm

Altura máxima de movimiento=48cm

Altura mínima de movimiento=24.5cm

Diámetro de la barra móvil=2.5cm

Densidad aluminio=2698.4 kg/m³

Volumen aproximado barra=0.0000785 m³

Masa aproximada de la barra (con contrapeso)= 0.2118+0.12=0.3318 gr

Momento de inercia de la barra= 0.006912 kg*m²

Área que forma la hélice al girar=0.0506 m²

Coefficiente de rozamiento entre materiales (acero con acero)=0.57

MODELO MATEMÁTICO

La planta descrita se basa en movimientos de rotación, luego para realizar la descripción matemática se partirá de la ecuación que describe el movimiento de un objeto rígido girando en torno a un eje:

$$\sum \tau = I\alpha \quad (1)$$

Tomando la barra y el conjunto motor-hélice como dos sólidos rígidos, se sabe que ambos giran en torno a un eje fijo: la barra gira alrededor de un eje imaginario que pasa a través de su centro de gravedad justo donde está ubicado el potenciómetro y por otro lado, el

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

rotor del motor hace girar la hélice alrededor del eje que pasa por sus respectivos centros formando una perpendicular con la barra. Para hallar los valores de la ecuación (1) se deben encontrar los momentos de inercia y torques que se encuentren o produzcan en el modelo.

Momento de inercia

El momento de inercia representa la capacidad de un sólido a resistirse a un cambio en su movimiento rotacional. Esta medida depende de las dimensiones y geometría del objeto, la barra se aproxima a una varilla y el motor y la hélice se toman como si fuera una masa concentrada en un punto, luego:

El momento de inercia de la barra es:

$$I_b = \int_{-0.24}^{0.26} \frac{0.2118}{0.5} x^2 dx \quad (2)$$

$$I_b = 4.4329 * 10^{-3} \text{ kg} * \text{m}^2$$

El momento de inercia del motor es:

$$I_m = 0.93 * (0.26)^2 \quad (3)$$

$$I_m = 0.0628 \text{ kg} * \text{m}^2$$

Momento de inercia total:

$$I_T = 0.0628 + 4.4329 * 10^{-3} \quad (4)$$

$$I_T = 0.0672 \text{ kg} * \text{m}^2$$

Torque

El torque es la cantidad que mide la capacidad de una fuerza de provocar una rotación alrededor de un punto. El torque de la barra se debe a la fuerza gravitacional o en el caso de que el sistema esté funcionando, a la fuerza de empuje generada por el motor, por otro lado, el torque del motor-hélice se toma como si se tratara de una masa puntual y la fuerza de empuje del motor será la fuerza con la que la hélice logre elevar la barra.

El torque de la barra es:

$$\tau_b = \int_{0.24}^{0.26} 9.8 * \frac{(0.2118)}{0.5} x dx \quad (5)$$

$$\tau_b = 0.207 \text{ sen}\theta \text{ Nm}$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Torque del motor es:

$$\tau_m = -0.26 * 9.8 * 0.93 \text{sen}\theta \quad (6)$$

$$\tau_m = -2.369 \text{sen}\theta \text{ Nm}$$

Torque de la fuerza de empuje (El motor y la hélice estarán orientados de tal forma que la fuerza que ejercen formara un ángulo de 90° con el vector de posición):

$$\tau_m = 0.26 * Fg * \text{sen}90^\circ \quad (7)$$

$$\tau_m = 0.26 Fg$$

Función de transferencia

La entrada será la fuerza de empuje creada por la aspas de la hélice al luchar contra la fuerza de gravedad y la salida será el ángulo que forma la barra móvil con la vertical ($\frac{\theta}{F_e}$):
Utilizando la ecuación análoga rotacional de la segunda ley de Newton (ecuación 8) teniendo en cuenta la fuerza de roce presente en el sistema entre el potenciómetro y la barra:

$$\sum \tau - \mu_k \dot{\theta} = I\ddot{\theta} \quad (8)$$

Reemplazando valores en la ecuación 7 se obtiene:

$$0.0207 \text{sen}\theta - 2.369 \text{sen}\theta + 0.26 Fg - \mu_k \dot{\theta} = I\ddot{\theta} \quad (9)$$

Como la ecuación 8 no es lineal, se linealiza utilizando las series de Taylor respecto a un punto de equilibrio ($\theta=45^\circ$) y obtener a su vez el valor de Fg:

$$\dot{\theta}_0 = \ddot{\theta}_0 = 0$$

Reduciendo y aplicando las condiciones anteriormente descritas la ecuación 8 se expresa:

$$-2.3483 \text{sen}45 + 0.26 Fg = 0$$

$$Fg = 6.386 \text{ N}$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\Delta f = \frac{\partial f}{\partial \ddot{\theta}} \Delta \ddot{\theta} + \frac{\partial f}{\partial \dot{\theta}} \Delta \dot{\theta} + \frac{\partial f}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial f}{\partial Fg} \Delta Fg = 0$$

$$\Delta Fg = 0.26Fg - 2.3483\cos 45 - \mu_k \Delta \dot{\theta} - 0.0672 \ddot{\theta}$$

Ecuación linealizada:

$$0.26\Delta Fg = 1.6604\Delta \theta + 0.57\Delta \dot{\theta} + 0.0672\Delta \ddot{\theta} \quad (10)$$

Aplicando transformada de Laplace a la ecuación 9:

$$0.26\Delta Fg(s) = 0.0672\Delta \theta(s)s^2 + 0.57\Delta \theta(s) + 1.6604\Delta \theta(s)$$

La función de transferencia hallada se describe en la ecuación 11:

$$\frac{\Delta \theta(s)}{\Delta F_e(s)} = \frac{0.26}{0.06782s^2 + 0.57s + 1.6604} \quad (11)$$

Una vez obtenido el modelo matemático que describe el sistema y se obtuvo de estos una función de transferencia; se hizo la conexión de la figura 5 donde se muestra la conexión hecha entre la tarjeta arduino el driver L298n, el motor y el potenciómetro que como se describió anteriormente, esta acoplado a la barra móvil del sistema.

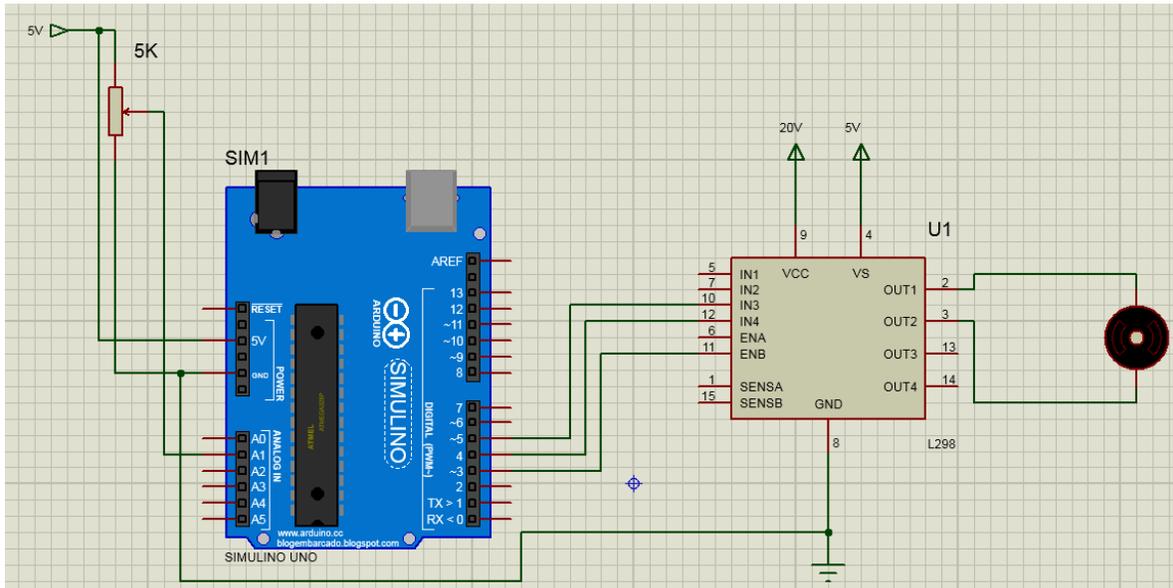


Figura 5. Conexión de dispositivos

Como se ve en la figura 5 el potenciómetro está conectado a una entrada análoga, el valor registrado por este será la entrada del sistema. Se utilizó la salida B del L298n tanto los pines de entrada (IN 3 Y 4) y el de habilitación (ENB) están conectados a los pines digitales, ya que se trata de variables de salida. La función de transferencia hallada con el modelo matemático no garantizaba una total precisión, así que para tener una respuesta más completa fue necesaria la obtención de la función de transferencia teniendo en cuenta el duty cycle del PWM del arduino, ya que esta sería la variable principal a controlar y era el método más confiable para recolectar la mayor cantidad de información posible sobre la planta; para ello fue necesario subir un programa al arduino donde se imprimiera un ciclo de trabajo de aproximadamente 70% del voltaje máximo al motor, con el fin de que la barra subiera a una altura donde permaneciera de manera horizontal, es decir, un escalón de voltaje a la planta y registrar la curva resultante.

Con el siguiente programa se realizó tal escalón de voltaje, donde primero se indica el estado de los pines de entrada del driver para que el motor gire en el sentido donde la fuerza de empuje se genere hacia abajo y el balancín pueda subir, luego se le aplica un valor entre 0 y 255 donde 255 es el 100% del duty cycle, en este caso es de 178 que

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

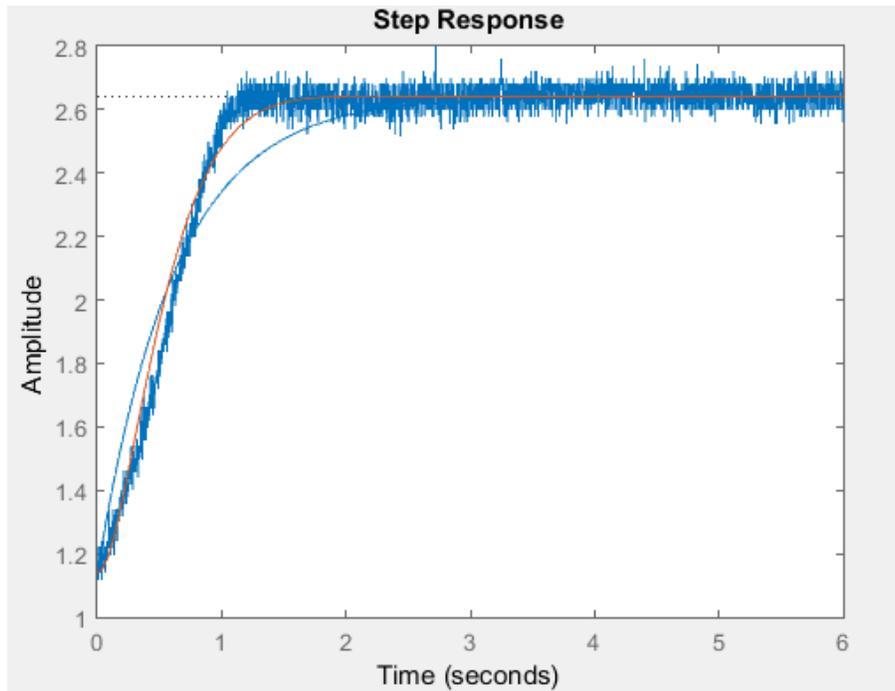
corresponde al 69.8% de 24V, es decir, 17V aproximadamente. Con este voltaje el balancín sube desde la mínima posición hasta estar completamente paralelo con la base del soporte vertical, es decir, 90º con la vertical.

```

int IN3 = 5; // Input3 conectada al pin 5
int IN4 = 4; // Input4 conectada al pin 4
int ENB = 3; // ENB conectada al pin 3 de Arduino
void setup ()
{
  pinMode (ENB, OUTPUT);
  pinMode (IN3, OUTPUT);
  pinMode (IN4, OUTPUT);
}
void loop()
{
  //Preparamos la salida para que el motor gire en un sentido
  digitalWrite (IN3, HIGH);
  digitalWrite (IN4, LOW);
  // Aplicamos PWM al pin ENB, haciendo girar el motor a 69,8% de la velocidad máxima
  analogWrite(ENB,178);
  delay(200);
}

```

Los datos se registraron con un osciloscopio; la gráfica 1 muestra la curva resultante (línea gruesa azul).



Gráfica 1. Respuesta al escalón

En la gráfica 1 se distinguen 3 líneas diferentes: la línea gruesa azul son los datos recopilados por el osciloscopio, la línea delgada azul es la aproximación de primer orden de la función de transferencia y la línea naranja es la aproximación de segundo orden de la función de transferencia, ambas muestran un tipo de respuesta críticamente amortiguado. De las dos aproximaciones hechas la de segundo orden era la que más coincidía con los datos reales, por ende, esta fue la función utilizada para realizar el proceso de control. El script utilizado es el siguiente:

```
clc
close all
```

```
%%%aproximación primer orden%%
```

```
K=2.64-1.14
Kt=(0.6*K)+1.14
```

```
T=0.6189
```

```
s=tf('s')
TF=(K/((T*s)+1))
figure(1)
```

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

```
hold on
step(TF+1.14)
```

%%% valores calculados para aproximación de segundo orden%%

```
zeta=0.9;          %factor de amortiguamiento
ts=1.3;           %tiempo establecimiento aproximado
wn=-log(0.02)/(zeta*ts);    %frecuencia de oscilación
```

```
TF2=K*(wn^2/(s^2+(2*zeta*wn*s)+(wn^2))) %aproximación a Segundo orden
```

```
figure(1)
hold on
step(TF2+1.14)
```

La función de transferencia de segundo orden es:

$$TF2 = \frac{16.77}{s^2 + 6.018s + 11.18}$$

Una vez obtenida la función de transferencia se procede a diseñar e implementar el controlador, teniendo en cuenta que la planta es totalmente inestable a lazo abierto y cuál de los parámetros de la respuesta se desea mejorar; en este caso, el tiempo de establecimiento es el parámetro más importante para que la planta funcione adecuadamente ya que el modelo críticamente amortiguado tiene una respuesta relativamente lenta. Para ello, fue necesario cerrar el lazo de control, es decir, utilizar el circuito de la figura 5 e incluir la lectura del potenciómetro en la programación tanto de simulink como de arduino. Las ganancias del controlador PID se obtuvieron por método experimental ya que la función de transferencia no cumplía los requerimientos necesarios para el método de Zigler-Nichols. Se realizó el criterio de Routh-Hurwitz de esta manera:

Polinomio: $s^2 + 6.018s + 11.18 + 16.77kp$

Arreglo matricial:

$$\begin{array}{l|ll} s^2 & 1 & 11.18 + 16.77kp \\ s^1 & 6.018 & \\ s^0 & c1 & \end{array}$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Luego para despejar k_p se aplica el determinante del arreglo y resolviendo la inecuación:

$$\frac{100.92k_p}{6.018} = 16.76k_p; \quad k_p \geq 0$$

Como no hay un rango establecido no es posible aplicar Ziegler-Nichols.

La figura 5 muestra el esquema realizado en simulink para encontrar las ganancias e implementar el controlador.

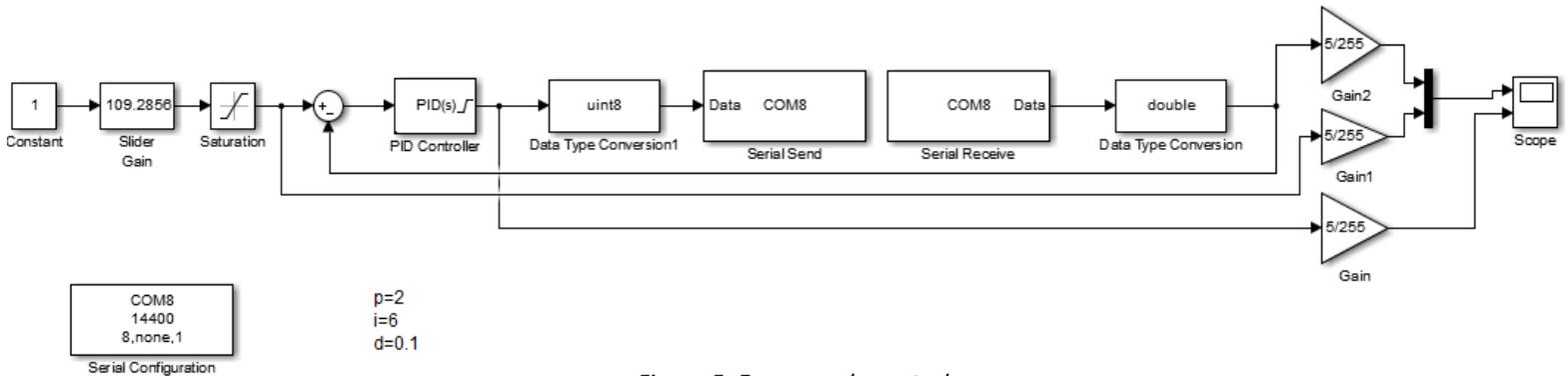


Figura 5. Esquema de control

El funcionamiento del diagrama es el siguiente: primero debe de inicializarse la comunicación arduino-simulink, para ello se utiliza el bloque *serial configuration* que también permite establecer la velocidad de comunicación con el ordenador, en este caso para que la capacidad de reacción de la planta fuera lo más rápida posible se utilizó una velocidad de 14400 bps, los datos recibidos por el arduino a través de la entrada analógica, es decir, el valor nominal que marca el potenciómetro, se transmiten a través del bloque *serial receive* donde pasan a ser convertidos en formato *double* por el bloque *data type conversion*, conversión necesaria para los elementos gráficos de simulink. Estos datos van a la señal de retroalimentación, es decir, al bloque *sum* con entrada (-), ya que esta señal hace parte del cálculo para el error relativo. Por otro lado, se tiene la parte del controlador; un bloque *constant* de ganancia 1, un bloque *slider gain* que está acotado entre 0 y 255 que es el rango en el cual trabaja el PWM del micro controlador, aunque el sistema tiene un rango de trabajo óptimo entre 55 y 180. Después viene un bloque de saturación que limita la amplitud de salida entre 0 y 255, esta señal va a la otra entrada (+) del bloque *sum*, es decir, junto con el bloque *slider gain* funcionarán como referencia para el controlador, luego, el resultado de la resta va al bloque PID cuyas ganancias halladas experimentalmente por método de prueba y error son $P=2$, $I=6$ y $D=0.1$.

Para implementar el control PID en la planta fue necesario subir el siguiente sketch en arduino, para inicializar el movimiento del motor por medio del driver y controlar la

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

comunicación serial entre simulink/arduino así como la lectura y escritura de datos en la planta.

```

int pinout=3; // pin digital de salida PWM. ENB=3 DRIVER.
byte ctrlmot=0; // variable que se escribirá en la salida PWM.
int IN3 = 5; // Input3 conectada al pin 5
int IN4 = 4; // Input4 conectada al pin 4
int pot_val=0; // variable que almacena lectura del potenciómetro

void setup()
{
  Serial.begin(14400);
  pinMode(pinout, OUTPUT);
  pinMode (IN3, OUTPUT);
  pinMode (IN4, OUTPUT);
}

void loop()
{
  digitalWrite (IN3, HIGH);
  digitalWrite (IN4, LOW);
  pot_val=analogRead(1); //leyendo potenciómetro.
  pot_val=map(pot_val, 0, 1023, 0, 255); //convertir a número de 8 bits.
  Serial.write(pot_val); //escribiendo dato en puerto serie.
  if(Serial.available(>0) // verifica si el puerto serie está habilitado.
  {
    ctrlmot=Serial.read(); // leer dato en el puerto serie.
    analogWrite(pinout, ctrlmot); // escritura de la señal de control en pinout.
  }
  delay(90); // espera para estabilizar el conversor.
}

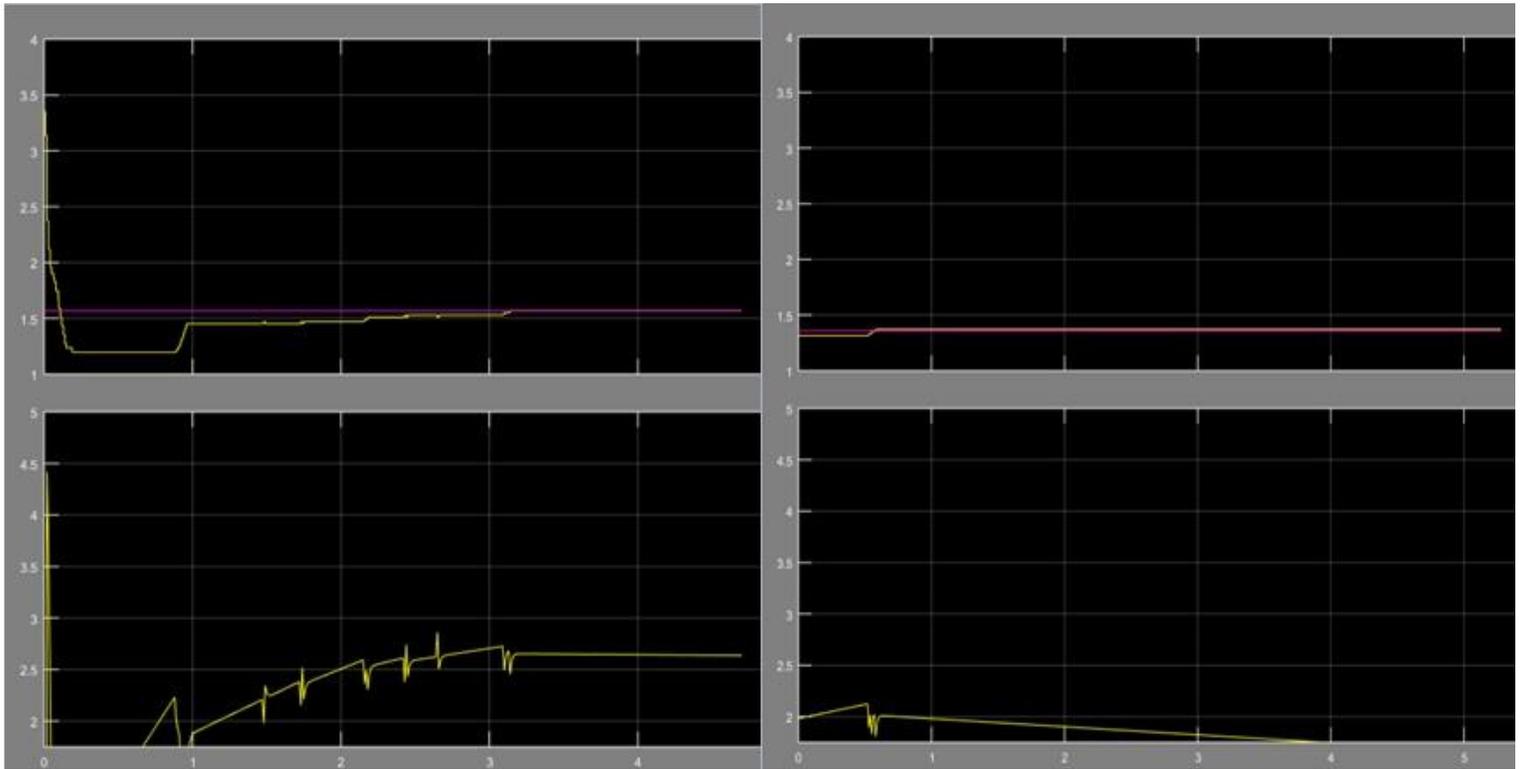
```

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

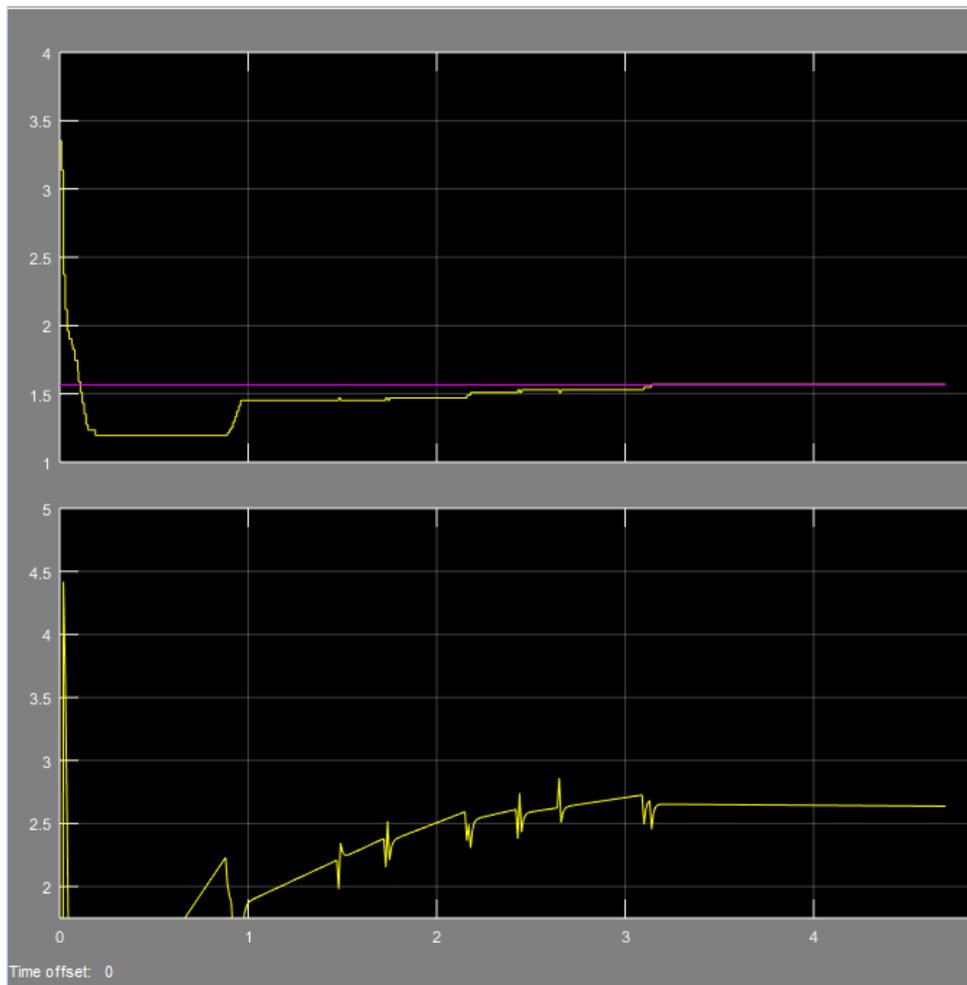
Una vez implementado el control PID, se procedió a realizar una serie de pruebas para comprobar su funcionamiento; se realizaron varios cambios de referencia, es decir, cambios en el voltaje de alimentación al motor, con las ganancias que tenía el controlador, el sistema debería buscar tal referencia y estabilizarse alrededor de los 5 segundos posteriores al cambio, al igual que ante una perturbación externa. Las siguientes figuras fueron capturadas con el osciloscopio virtual de simulink, donde en los cuadros superiores se observan una línea morada que pertenece a la referencia que se aplica y una amarilla que registra la señal de entrada (potenciómetro), en el recuadro inferior la línea amarilla es la señal de control.

La referencia que como se había dicho antes, es un valor entre 0 y 255 donde 0 es 0V y 255 es 24V, a medida que la referencia es mayor, es decir, el ángulo que se pide supera los 90°, la planta comienza a perder estabilidad, esto es debido a la distribución de masas con la que la planta fue fabricada, ya que a cierto ángulo (mayor que los 110°) la relación entre la componente vertical de la fuerza gravitacional y la fuerza de empuje pierde proporcionalidad y el balancín busca la posición vertical, es por eso que el rango de movimiento y aplicación del controlador está limitado para que esta no haga una revolución completa o la planta no pueda volver a su posición original de manera automática, así que el rango de movimiento es en realidad un valor entre 5V y 17V, aproximadamente los 30° y 110° (55 y 180).



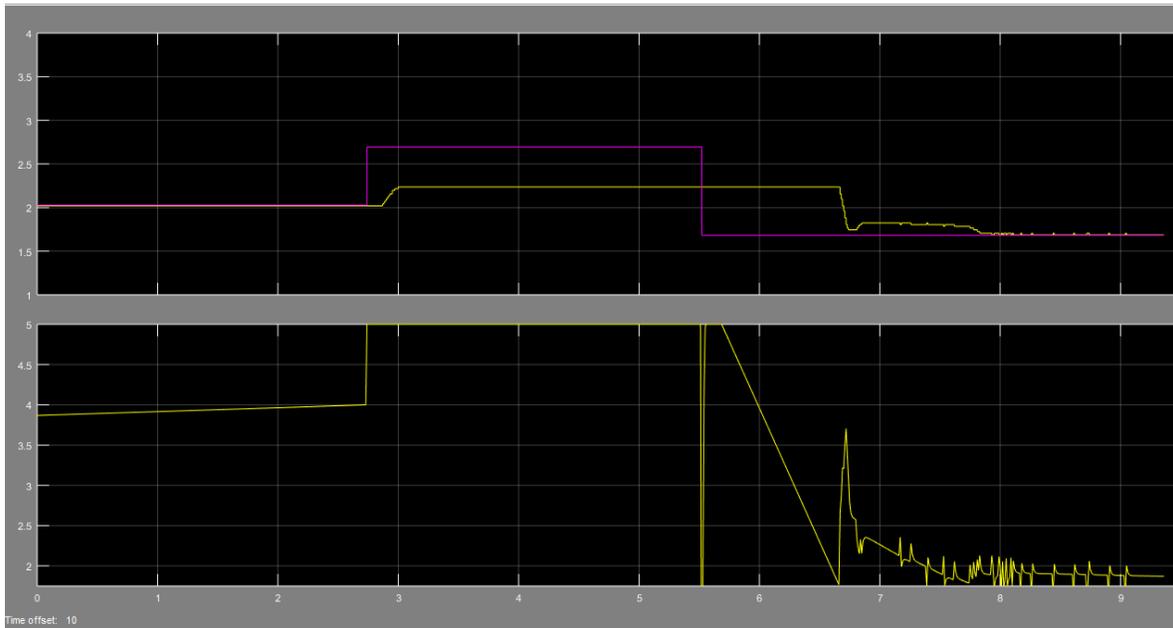
Gráfica 2. Respuesta para 6.5 V (69 duty cycle)

En la gráfica 2 la referencia tiene un valor de 69, 43° aproximadamente (6.5V al motor), se ve que el sistema comenzó de una posición más alta pero se encontró la referencia rápidamente con unos pequeños sobre impulsos que sin embargo no afectan el resultado final ya que alrededor de los 5 segundos la planta se estabilizó totalmente.



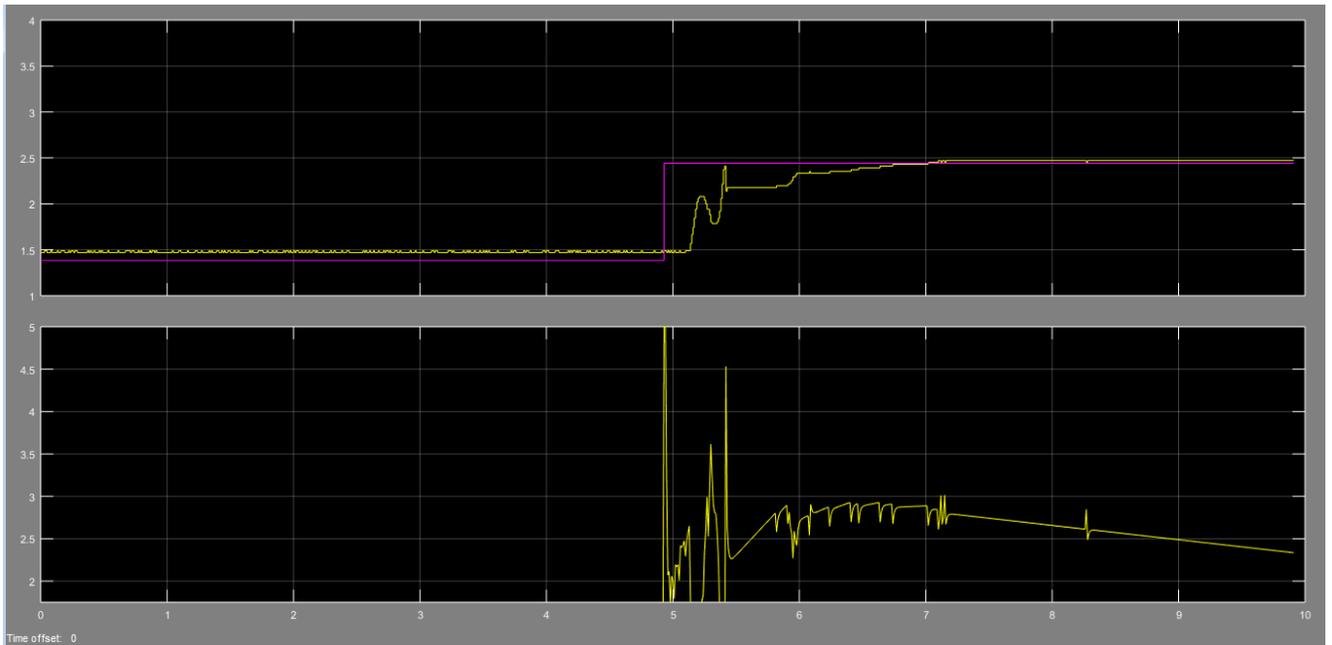
Gráfica 3. Respuesta 7,43V (79 duty cycle)

En la gráfica 3 se ilustra la respuesta a una referencia de 43° (7,43 V), como puede observarse el controlador logró estabilizar la planta alrededor de los 4 segundos, aumentando el voltaje de manera logarítmica excepto por un pequeño sobre impulso al segundo de comenzar la medición, pero físicamente es casi imperceptible y puede deberse a la velocidad del puerto serial del micro controlador o a la resolución del potenciómetro.



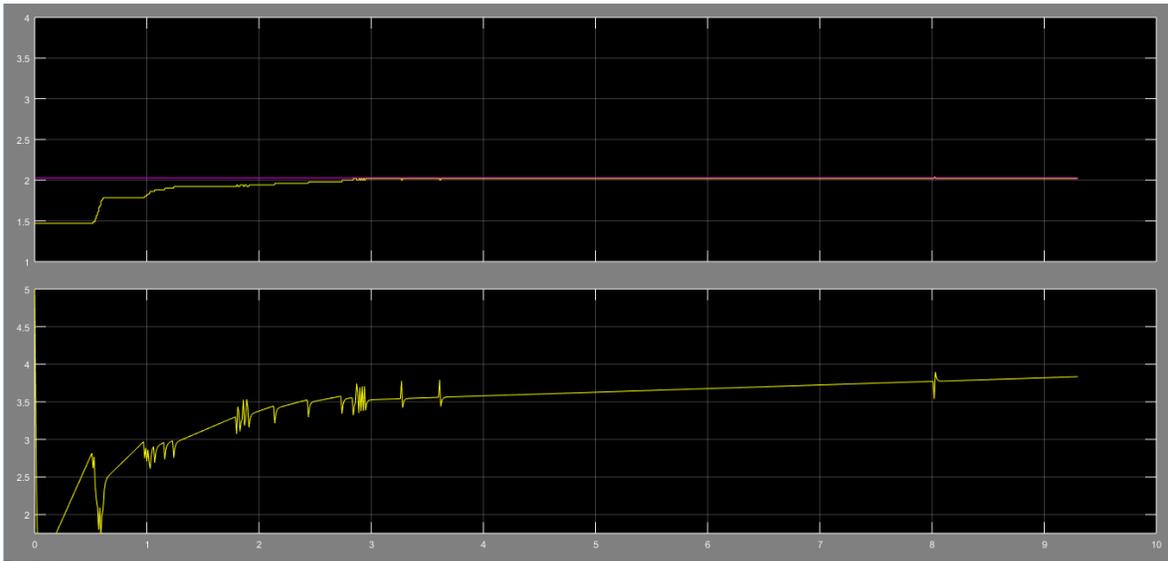
Gráfica 4. Respuesta 8V (86 duty cycle)

La gráfica 4 muestra la respuesta obtenida para un referencia de 86, es decir, 47° y 8V de alimentación para el motor inicialmente, luego, se observan dos cambios de referencia, el primero a 50° y el segundo 45° , la señal de control no alcanzó la primer referencia, ya que el tiempo entre el primer y el segundo cambio fue de aproximadamente de 3 segundos y el tiempo de establecimiento para la planta es de aproximadamente 5 segundos, por otro lado, para la segundo referencia, se presentaron unos pequeños sobre impulsos debidos al cambio de voltaje; el giro del motor produce ruido el cual genera pequeños cambios en la lectura del sensor, luego la señal de error puede demorarse en compensar esta señal con el cambio en la referencia, sin embargo a los 10 segundos aproximadamente el sistema se estabiliza.



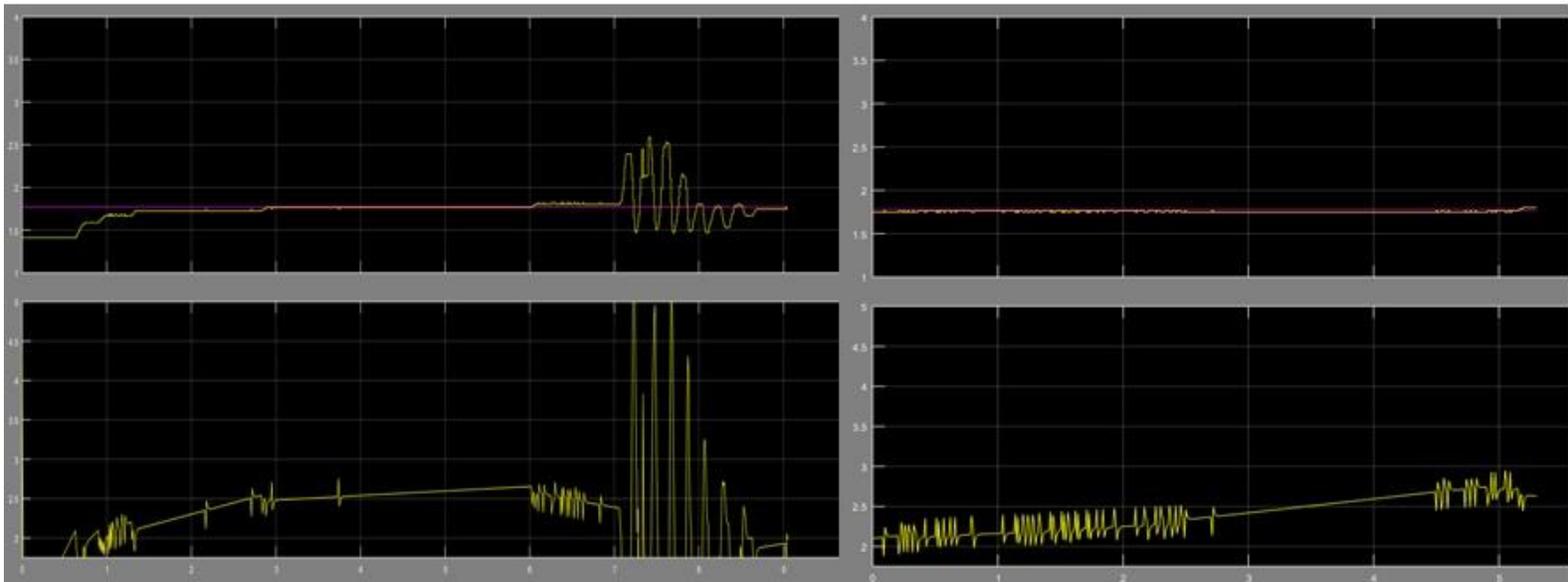
Gráfica 5. Respuesta 11,6 V (124 dutty cycle)

En la gráfica 5 se observa el cambio de referencia a 68° (11,6V), como se explicó anteriormente, el ruido presente se debe al cambio en la referencia, sin embargo como se observa en el recuadro superior, el sistema alcanzó esta referencia alrededor de los 4,5 segundos y sin sobre picos altos de voltaje.



Gráfica 6. Respuesta 12.04V (128 dutty cycle)

En la gráfica 6 se incrementó la referencia a 69.8°, después de observarse unos pequeños sobre impulsos en los primeros segundos, se observa el crecimiento casi logarítmico del voltaje hasta alcanzar la referencia y como a los 4 segundos se estabiliza totalmente en la posición deseada.



Gráfica 7. Respuesta ante una perturbación externa

La gráfica 7 ilustra la respuesta del sistema ante una perturbación externa; en el recuadro superior se observa una oscilación al final del recuadro cuyos sobre picos van disminuyendo y la planta finalmente se estabiliza 3 segundos después de haber ocasionado tal perturbación, por otro lado en el recuadro inferior se observa la señal de control compensando el error actual, aumentando el voltaje de manera casi lineal hasta alcanzar el valor deseado.

En general la respuesta obtenida con el controlador tenía ciertos rizados debido a la vibración que generaba el motor al girar; aunque se presentaron unos sobre impulsos relativamente notables al momento de cambiar la referencia o de introducir una perturbación externa, el sistema cumplía con las características deseadas. Aunque la resolución del sensor y la velocidad de comunicación establecida funcionaron satisfactoriamente para la corrección del error y el envío/recepción de datos, estos parámetros podrían mejorarse con un potenciómetro lineal ya que este presenta una mejor precisión en la lectura de los datos, y con un micro controlador o dispositivo más eficiente y con una velocidad de comunicación más alta y precisa que la del arduino.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

- La función de transferencia hallada por método experimental, describió satisfactoriamente la dinámica del sistema.
- La sintonización del controlador PID cumplió con los parámetros de diseño establecidos: sobre picos mínimos y un tiempo de establecimiento menor de 10 segundos.
- La construcción de la planta tiene algunas limitaciones: el rango de movimiento debe de estar acotado para que el controlador funcione de manera satisfactoria, si la planta tiene una mejor distribución de pesos respecto al centro de gravedad o si se tiene una relación proporcional entre el diámetro de la hélice y la potencia del motor, la planta podría mejorar su funcionamiento.
- El uso del driver L298n facilitó la construcción del circuito requerido para el modelo, ya que solo fue necesario realizar la conexión con el arduino y procurar alimentar correctamente el motor y el driver.
- El modelo matemático desarrollado no fue cien por ciento preciso, ya que se trata de medidas que tienen un porcentaje de error por lo cual, al realizar operaciones matemáticas la propagación de este error va creciendo y la función de transferencia resultante no alcanza a describir la planta en su totalidad.
- Los programas utilizados tanto en arduino como en matlab y el diagrama de bloques de simulink se desarrollaron correctamente permitiendo establecer las comunicaciones necesarias entre los dispositivos involucrados.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Se recomienda utilizar un potenciómetro lineal para mejorar la lectura de datos análogos, ya que la resolución de este es más precisa que la de un potenciómetro logarítmico ayudando a mejorar la compensación de la señal de error.
- El uso de un micro controlador que posea una velocidad de comunicación serial más alta mejoraría la capacidad de reacción de la planta ya que el tiempo entre la lectura del dato y la introducción de este a la señal de error y al controlador disminuiría considerablemente haciendo que la planta funcione más rápido.
- Como proyección futura se podría llevar a cabo la implementación de técnicas de control más avanzadas con las cuales se optimice su comportamiento.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

- Datasheet L298n. www.Alldatasheet.com.
- Katsuhico Ogata. (2010). Ingeniería de control moderna. Madrid. Pearson educación S.A.
- Kuo. C. Benjamin. (1996). Sistemas de control automático. México. Prentice-Hall.
- Mathworks. <https://www.mathworks.com>.
- Playground Arduino. <https://www.arduino.cc/>.
- Serway. A. Raymon. (2008). Física para ciencias e ingenierías. Volúmen I. México. Cengage learning.
- Viltres La Rosa, V. (2012, Junio). Control de posición de un balancín con motor y hélice. Recuperado de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/1895/1/PFC-P%2026>.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

APÉNDICE

Apéndice A

Programa arduino para escalón PWM

```

int IN3 = 5; // Input3 conectada al pin 5
int IN4 = 4; // Input4 conectada al pin 4
int ENB = 3; // ENB conectada al pin 3 de Arduino

void setup ()
{
  pinMode (ENB, OUTPUT);
  pinMode (IN3, OUTPUT);
  pinMode (IN4, OUTPUT);
}

void loop()
{
  //Preparamos la salida para que el motor gire en un sentido
  digitalWrite (IN3, HIGH);
  digitalWrite (IN4, LOW);
  // Aplicamos PWM al pin ENB, haciendo girar el motor a 69,8% de la velocidad máxima
  analogWrite(ENB,178);
  delay(200);
}

```

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Apéndice B

Script matlab para la función de transferencia

```

clc
close all

%%aproximación primer orden%%

K=2.64-1.14
Kt=(0.6*K)+1.14

T=0.6189

s=tf('s')
TF=(K/((T*s)+1))
figure(1)
hold on
step(TF+1.14)

%%valores calculados para aproximación de segundo orden%%

zeta=0.9;
ts=1.3;
wn=-log(0.02)/(zeta*ts);

TF2=K*(wn^2/(s^2+(2*zeta*wn*s)+(wn^2))) %aproximación a Segundo orden

figure(1)
hold on
step(TF2+1.14)

```

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Apéndice C

Programa arduino para la implementación del controlador

```

int pinout=3; // pin digital de salida PWM. ENB=3 DRIVER.
byte ctrlmot=0; // variable que se escribirá en la salida PWM.
int IN3 = 5; // Input3 conectada al pin 5
int IN4 = 4; // Input4 conectada al pin 4
int pot_val=0; // variable que almacena lectura del potenciómetro

void setup()
{
  Serial.begin(14400);
  pinMode(pinout, OUTPUT);
  pinMode (IN3, OUTPUT);
  pinMode (IN4, OUTPUT);
}
void loop()
{
  digitalWrite (IN3, HIGH);
  digitalWrite (IN4, LOW);
  pot_val=analogRead(1); //leyendo potenciómetro.
  pot_val=map(pot_val, 0, 1023, 0, 255); //convertir a número de 8 bits.
  Serial.write(pot_val); //escribiendo dato en puerto serie.
  if(Serial.available(>0) // verifica si el puerto serie está habilitado.
  {
    ctrlmot=Serial.read(); // leer dato en el puerto serie.
    analogWrite(pinout, ctrlmot); // escritura de la señal de control en pinout.
  }
}

```

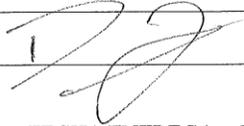
 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

delay(90); // espera para estabilizar el conversor.

}

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

 Institución Universitaria	EVALUACIÓN DE MODALIDAD TRABAJO DE GRADO Y PRÁCTICAS PROFESIONALES	Código	FDE 090
		Versión	04
		Fecha	2015-10-05

FIRMA ESTUDIANTES	<u>Mariana D.F.</u> <hr/> <hr/>
FIRMA ASESOR	 <hr/> <hr/>
FECHA ENTREGA: <u>23/02/17</u>	

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: _____