

DISEÑO DE CONTROLADOR PID ANÁLOGO Y DIGITAL Y ESTUDIO COMPARATIVO DE EFICIENCIA EN UNA PLANTA DE MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA.

Jaime Jalomo Cuevas, Pablo Eliud de la Cruz Moreno, José de Jesús García Cortez.

Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán

División de Estudios de Posgrado e Investigación

Avenida Tecnológico # 100 C.P. 49100

C.P. 49100 Cd. Guzmán, Jalisco

Teléfono: 01 341 5752050

jjalomo3@yahoo.com.mx, pe_pablo123@hotmail.com.mx, jesusgc@itcg.edu.mx

RESUMEN.

En este artículo se presenta el diseño e implementación de un controlador PID en tres formas diferentes análogo, digital en tiempo real y simulación. El controlador digital será aplicado en tiempo real en un motor de corriente directa (CD) por medio del software Matlab y la tarjeta de adquisición de datos Agilent. Por medio del modelo matemático obtenido se realizará el control PID en simulación con Matlab Simulink y el control análogo se aplicará con un control PID desarrollado con amplificadores operacionales. Se realizará un estudio comparativo con lo cual podremos ver las ventajas y desventajas de cada controlador.

Palabras clave: Control PID, motor de CD, tarjeta de adquisición de datos.

ABSTRACT.

This paper is about the design and implementation of the PID control in three different ways analogic, digital in real time and simulation, the control digital will be implemented in real time in an instrumented motor of direct current with the software Matlab and the data acquisition system Agilent, with the mathematical model obtained, we will do the PID control by simulation with the software Matlab Simulink, and the analog control will be implemented with a PID control developed with operational amplifiers, we will do a comparative study of the analogic and digital controls versus the simulation, with that study we will get the vantages and disadvantages of each control.

Keywords: PID control, CD motor, data acquisition system.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se han realizado muchas implementaciones del control PID análogo para el control de motores de corriente directa, en el cual se busca mejorar la eficiencia usando métodos de sintonización como Ziegler Nichols entre otros [14], pero solo son en simulación, por lo cual en este trabajo se plantea la implementación de un controlador PID digital para realizar un estudio comparativo de eficiencia con tres formas diferentes, la primera de estas es por medio de la

simulación, la segunda de forma analógica y la tercera en tiempo real de forma digital con la tarjeta de adquisición de datos Agilent. Con esto se busca que con la aplicación de un buen control nos genere los mayores beneficios, el cual depende de la variable de control utilizada, que en nuestro caso se vería reflejada en el consumo de energía eléctrica ya que nuestra señal de entrada es un voltaje, una de las principales características que se debe tener en cuenta es la estabilidad de la señal con lo cual obtendremos un buen rendimiento y controlabilidad de nuestra planta.

La planta en la que se implementaran el controlador PID análogo y digital será un motor de corriente directa instrumentado Figura 1. El cual servirá para realizar la comparación con la simulación y así poder experimentar con este método de control PID clásico y saber cuál controlador presenta una mayor eficiencia.

En este trabajo se presenta una herramienta que nos permite que se realice de forma interactiva el control experimental de un motor de corriente directa, con las siguientes estrategias implementadas: control en tiempo real de un motor de corriente directa por medio de control clásico y por medio de la simulación. En las cuales podrán ser modificados sus parámetros más significativos y comparar los distintos resultados.

Existen diferentes maneras de controlar un motor de corriente directa, en nuestro caso, una solución factible es la implementación de dos tipos de controles y así realizar una comparación de los controles que será el controlador PID análogo y controlador PID digital [4].

Nuestro sistema físico será controlado a través de una retroalimentación de lazo cerrado y para realizar las pruebas será necesario el modelo matemático del sistema que tiene una gran relación al momento de hacer el diseño de nuestro control ya que el sistema físico nos permite hacer la formulación del problema y el modelo matemático nos da la solución para trasladarlo al sistema físico y obtener así nuestra solución del problema [8].

Los motores de corriente continua tienen varias particularidades que los hacen muy diferentes a los de corriente alterna. Una de las particularidades principales es que pueden funcionar a la inversa, es decir, no solamente pueden ser usados para transformar la energía eléctrica en energía mecánica, sino que también pueden funcionar como generadores de energía eléctrica. Esto sucede porque tienen la misma constitución física, de este modo, tenemos que un motor eléctrico de corriente continua puede funcionar como un generador y como un motor [7].

Los motores de corriente continua tienen un par de arranque alto, en comparación con los de corriente alterna, también se puede controlar con mucha facilidad la velocidad. Por estos motivos, son ideales para funciones que requieran un control de velocidad. Son usados para distintas cosas como por ejemplo en trenes, coches eléctricos, ascensores, cadenas productivas, y todas aquellas actividades donde el control de las funcionalidades del motor se hace esencial [7].



Figura 1. Motor de CD instrumentado.

2. MODELO MATEMÁTICO

Para la realización de la simulación es necesario contar con el modelo matemático del motor de corriente directa que lo represente, ya que para diseñar algoritmos de control es importante conocer dicho modelo. En este caso las propiedades matemáticas del modelo son estudiadas para facilitar el análisis y propuesta de nuevas estrategias de control. [10]

Para obtener el modelo matemático utilizaremos la parametrización de modelo por técnicas de identificación, para lo cual utilizaremos la herramienta de identificación del software Matlab, para obtener el modelo matemático debemos tener la caracterización de los datos de entrada y salida de nuestra planta e importarlos a la herramienta de identificación de Matlab para hacer la estimación del modelo matemático.

En la Figura 2 se muestra la interfaz de la herramienta Ident de Matlab que es utilizada para la identificación de modelos lineales y no lineales, con esta herramienta se realizó la estimación de la función de transferencia de nuestro sistema.

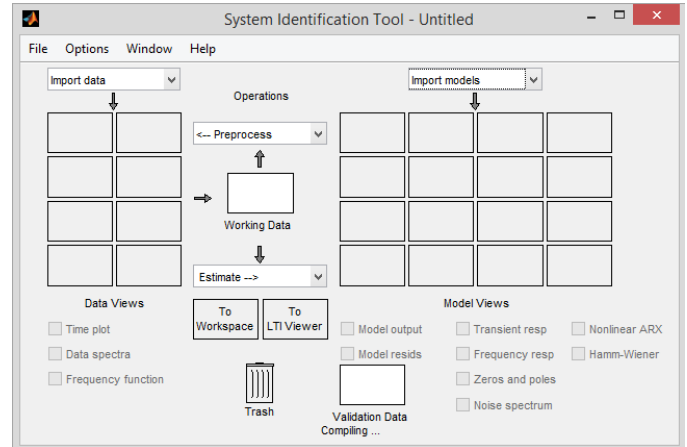


Figura 2. Herramienta Ident.

El modelo matemático que se desarrolla a partir de un sistema no es único, debido a lo cual se pueden lograr representaciones diferentes del mismo proceso. El modelo matemático obtenido del motor de corriente directa [3] es de segundo orden como se muestra en la ecuación 1.

$$G(s) = \frac{1.1273}{0.003573s^2 + 3.3547s + 1} \quad (1)$$

3. DISEÑO DEL CONTROL PID CLÁSICO

Un controlador PID tiene tres parámetros (K_p, T_i, T_d) los cuales interactúan uno con el otro y su ajuste para obtener el mejor control puede ser por diferentes métodos [12].

La combinación de una acción de control proporcional, una acción integral y una acción de control derivativa se denomina acción de control proporcional-integral-derivativo (PID). Esta acción combinada tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) \cdot dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

En el dominio s la función de transferencia del controlador PID se puede escribir como [1]:

$$G_c(S) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2)$$

Donde:

K_p Es la ganancia proporcional.

T_i Tiempo integral.
 T_d Tiempo derivativo.

El control PID se diseñó en Simulink de Matlab donde se utilizó el bloque PID, estos controladores han mostrado ser robustos y con muchos beneficiosos en el control de diversas aplicaciones de gran importancia en la industria.

Los métodos de sintonización están basados en estudios experimentales como es el caso de Ziegler Nichols en el cual se hace el estudio de la curva que resulta de la aplicación de una señal escalón a la planta, para después obtener los datos de tiempo de retardo y la constante de tiempo que son aplicados en las formulas desarrolladas por Ziegler Nichols, para obtener los valores de las ganancias K_p , T_i y T_d [13], en nuestro caso el ajuste de las ganancias para la sintonización, se realizó por medio del método de auto sintonización de Matlab.

Las ganancias (K_p , T_i , T_d) obtenidas de la auto sintonización del bloque PID del software Matlab Simulink se muestran en las siguientes ecuaciones:

$$K_p = 1.475 \quad (3)$$

$$T_i = 0.673 \quad (4)$$

$$T_d = 0.050 \quad (5)$$

Un sistema de control de lazo cerrado es aquél donde la señal de salida tiene efecto sobre la acción de control. En la Figura 3 se observa el lazo cerrado del control PID con el modelo matemático de nuestro motor de corriente directa con el cual obtenemos las respuestas en simulación de nuestra planta, donde se puede apreciar, que la salida es retroalimentada para establecer la diferencia entre el valor de referencia y el valor obtenido a la salida, y en base a esta diferencia realizar acciones de control adecuadas.

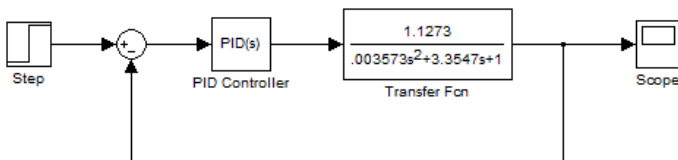


Figura 3. Control PID.

La simulación del control PID analógico se desarrolló con amplificadores operacionales en el programa de simulación Proteus isis como se muestra en la Figura 4, el diagrama está constituido por la referencia del controlador RV1, que es un potenciómetro de 10K que nos sirve para que la referencia pueda variar de 0-5V. Esa señal pasa a un restador para obtener el error y mandarlo al controlador PID formado por los amplificadores operacionales U4, U2 y U5, el amplificador U4 es un amplificador inversor de ganancia 1 donde se aplica un voltaje positivo del error a través de la resistencia R6 a la

entrada (-) del amplificador operacional y se proporciona retroalimentación negativa mediante la resistencia R5.

El voltaje entre las entradas (+) y (-) es casi a 0 V. Por tanto, la terminal de entrada (-) también está a 0 V, de modo que el potencial de tierra está en la entrada (-). Por esta razón, la entrada (-) se dice que es un tierra virtual [5].

Con el amplificador operacional U2 se realiza la parte integral y con el amplificador operación U5 obtenemos la parte derivativa, todas esas señales son sumadas con U3 que es un sumador inversor y la salida de voltaje es igual la suma de los voltajes de entrada [5].

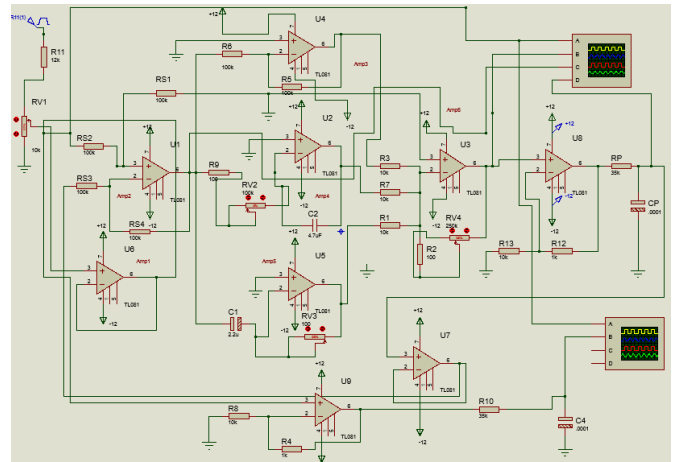


Figura 4. Control PID analógico.

Las especificaciones de diseño de un sistema de control a menudo involucran ciertos requerimientos asociados con la respuesta del sistema, a continuación se definen las principales características de la especificación del sistema en lazo cerrado [9]:

Tiempo de levantamiento, t_r : Tiempo para que la respuesta pase del 0 al 100 de su valor final.

Máximo sobre impulsó, M_p : Es el valor pico máximo de la curva de repuesta, medido a partir de la unidad.

Tiempo de asentamiento, t_s : 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.

4. DATOS DE ENTRADA Y SALIDA

Los datos de entrada y salida que se emplearon para nuestro sistema son señales de voltaje; La referencia utilizada para la realización de estas pruebas en nuestro controlador es un escalón con una amplitud de 3V que comienza después de 10 segundos de simulación como se muestra en la Figura 7.

El controlador PID analógico y digital entregan una señal de voltaje; La señal de control utilizada en el motor de corriente directa es una señal analógica de voltaje por lo cual se toma directamente del controlador sin hacer ningún acoplamiento de señales.

El motor de corriente directa utilizado, tiene una ganancia unitaria, por lo tanto la señal de salida es también una señal analógica de voltaje de igual magnitud que la entrada, por lo cual no es necesario utilizar algún tipo de transmisor en la retroalimentación de la salida, ya que las señales se pueden acoplar con la referencia para realizar el control.

5. RESULTADOS

En la Figura 5 se muestra en color azul la respuesta del motor de corriente directa con el controlador PID, obtenida de la simulación utilizando su modelo matemático, en esa figura se observa que a los 50 segundos se le aplica una perturbación al sistema de un escalón unitario para verificar su robustez en la cual podemos ver que el controlador empieza a llevar la señal al valor de nuestra referencia de 3V en color rojo.

El tiempo de levantamiento con nuestro controlador PID en simulación es de 4.6 segundos, el máximo sobre impulso es del 3.6 % y el tiempo de asentamiento es de 16 segundos.

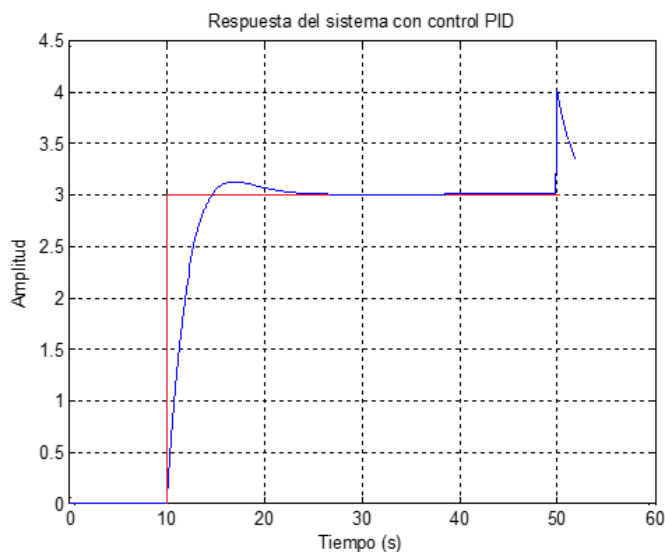


Figura 5. Respuesta del sistema con control PID en simulación.

En la Figura 6 se muestra la salida del controlador PID en

simulación donde la máxima demanda de voltaje es de 4.7V la cual sucede al arranque del motor, con ese voltaje nuestro sistema se encuentra dentro los valores permitidos, en estado estable nuestro controlador se mantiene en 2.6 V que son los necesarios para que nuestro sistema se mantenga en la referencia deseada.

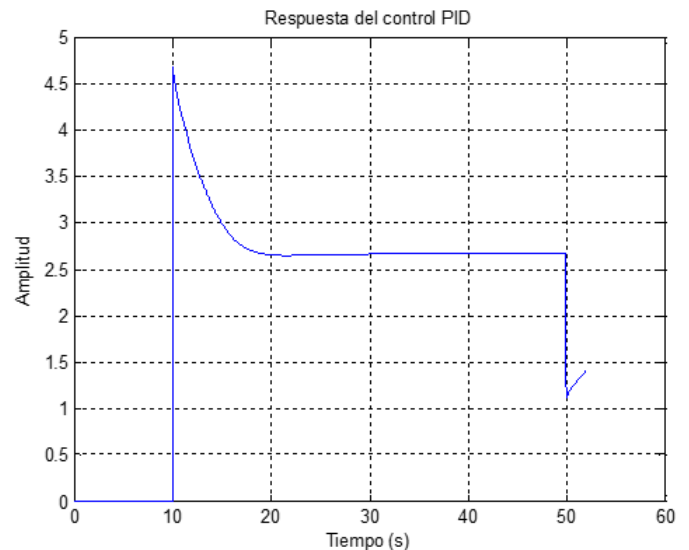


Figura 6. Respuesta del control PID en simulación .

En la Figura 7 se muestra la señal de referencia utilizada. Esta señal de referencia fue igual para nuestro control PID analógico, digital y en simulación con una amplitud de 3 volts.

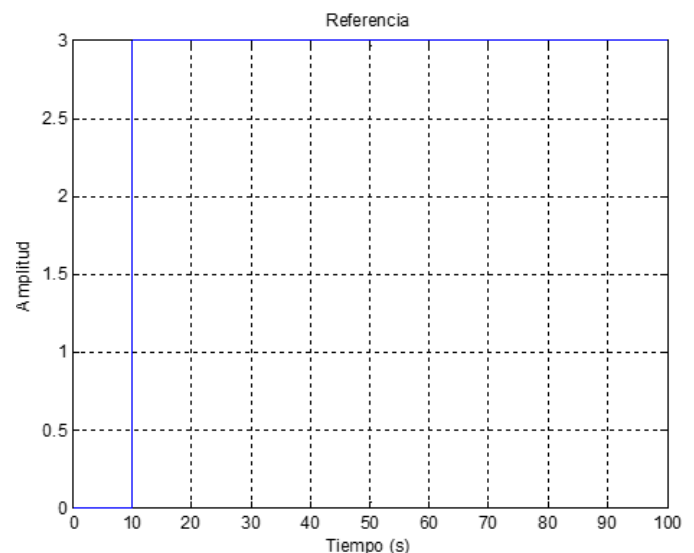


Figura 7. Referencia.

En la Figura 8 se muestra en color azul la respuesta en tiempo real del motor de corriente directa con el controlador PID digital obtenida con la tarjeta de adquisición de datos

Agilent en el cual al igual que en la simulación a los 50 segundos se le aplica una perturbación al sistema para verificar su robustez y aun así se volvió a establecer en el valor de la referencia de 3 volts que aparece en color rojo.

El tiempo de levantamiento con nuestro controlador PID digital es de 12 segundos, el máximo sobre impulso es del 50 % y el tiempo de asentamiento es de 16 segundos.

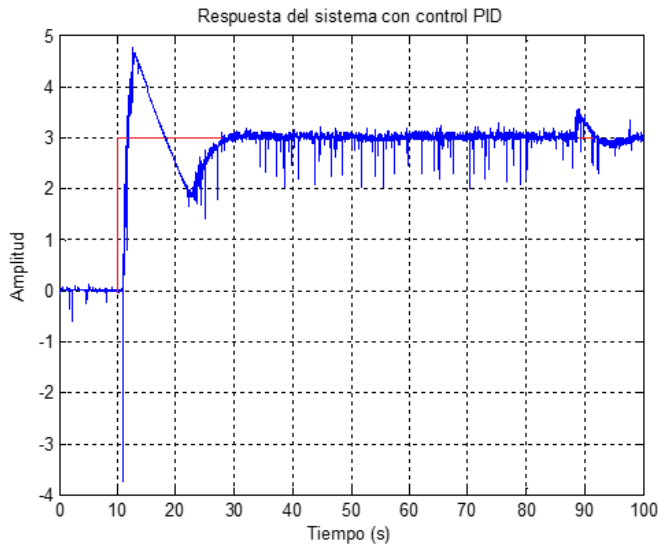


Figura 8. Respuesta del sistema con control PID digital

En la Figura 9 se muestra la respuesta del controlador PID digital con la tarjeta de adquisición de datos Agilent la cual nos muestra el voltaje que se tiene que compensar para que el controlador llegue a nuestra referencia de 3 V.

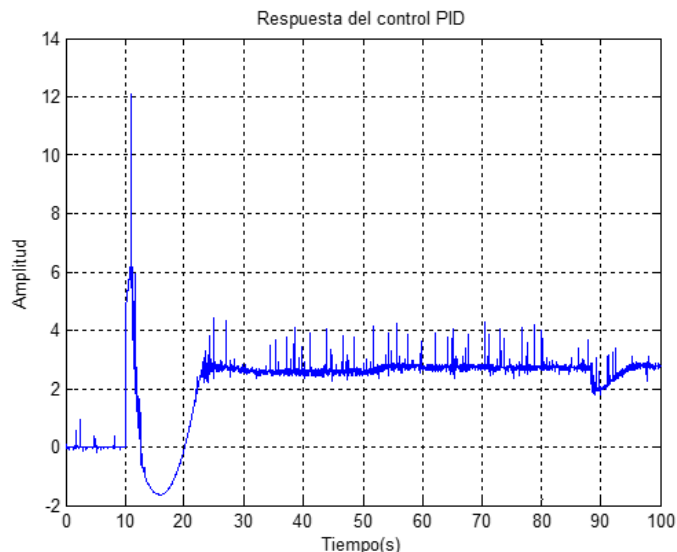


Figura 9. Respuesta del control PID digital.

En la Figura 10 se muestran en color azul la señal obtenida en la salida del motor de corriente directa en tiempo real, la cual nos muestra la respuesta del controlador PID analógico a un escalón con una amplitud de 3V que es nuestra referencia en color rojo, a los 50 segundos se puede observar que se le aplica la perturbación al sistema la cual le afecta muy poco al sistema y el valor vuelve a estabilizarse en nuestra referencia de 3V.

El tiempo de levantamiento es de 8 segundos, el máximo sobre impulso es del 2 % y el tiempo de asentamiento es de 7.56 segundos.

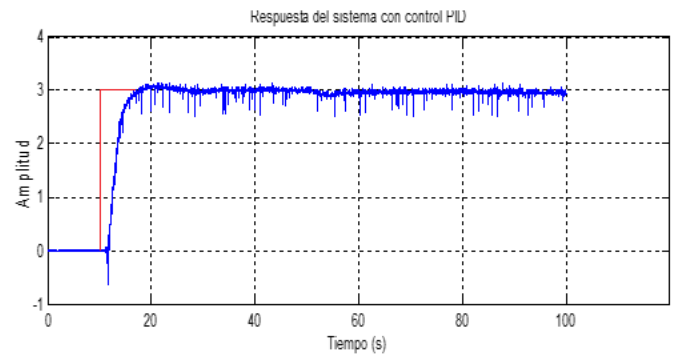


Figura 10. Respuesta del sistema con control PID analógico.

En la tabla 1 se presentan los datos de tiempo de levantamiento, máximo sobre impulso y el tiempo de asentamiento, obtenidos con los controladores PID en simulación con el software Matlab, de forma digital con la tarjeta de adquisición de datos Agilent y por último el controlador analógico desarrollado con amplificadores operacionales:

Tabla 1. Resultados del controlador PID

Controlador PID			
	tr	%Mp	ts
Simulación	4.6	3.6	16
Digital	12	50	16
Analógico	8	2	7.56

6. CONCLUSIONES

Después de aplicar los controles PID analógico y digital podemos observar que el control analógico es más robusto que el controlador PID digital; Además con el control digital se obtiene un mayor tiempo para llegar al estado estable que con el control analógico; El control PID digital presenta un sobre impulso del 50% y este es un valor excesivo.

El control PID analógico no presenta el sobre impulso del control digital por lo cual podemos decir que el control PID analógico es mejor que el control digital, ya que la respuesta del control PID analógico es más parecida a la señal obtenida en la simulación con el modelo matemático del motor de corriente directa, y una de las principales razones es por la velocidad de respuesta de cada uno de los controladores.

Una desventaja de los controladores digitales es que su respuesta depende del tiempo de muestreo, y por más pequeña que esta sea siempre es más rápido el control analógico, por lo cual en las aplicaciones de controles industriales el controlador analógico es más confiable que los controladores digitales.

7. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a todos los maestros que imparten los cursos en la maestría en ingeniería electrónica del Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán ya que con la aportación de sus conocimientos fue posible obtener estos resultados.

8. REFERENCIAS

- [1] Katsuhiko, Ogata. *Ingeniería de Control Moderna*. Editorial Prentice Hall. Madrid, España. 2003.
- [2] Kuo, Benjamín C. *Sistemas de Control Automático*. Prentice Hall, México. 1999.
- [3] Dorf, Richard C. *Sistemas de control moderno*. Prentice Hall, España. 1980.
- [4] Chen, Chi-Tsong, *Linear Systems Theory and Design*, Oxford University Press, Estados Unidos. 1999.
- [5] Robert F. Coughlin, *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales*, Prentice Hall, México, 1993.
- [6] J. K. Ang, G. Chong, and Y. Li, *PID control system analysis, design and technology*, IEE Trans. Control system Technology, vol 13, pp. 555-579, 2005.
- [7] Robert L. Mott, Sergio Saldaña Sánchez, Ángel Hernández Fernández, Jaime Villanueva Sánchez, *Diseño de elementos maquinas*, Pearson educación, México, 2006.
- [8] Charles L. Phillips, H. Troy Nagle, *Digital control system analysis and design*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1995.
- [9] Gene F. Franklin, *Digital control of dynamic system*, Addison Wesley Longman, 1997.
- [10] Kai velten, *Mathematical modeling and simulation introduction for scientists and engineers*, Wiley-wch verlaf GmbH & Co.kbaA. Germany, 2009.
- [11] William L. Luyben, *Process modeling, simulation, and control for chemical engineers*, McGraw-Hill, Montreal, 1996.
- [12] Joseph J. Distefano, Allen R. Stubberud, Ivan J. Williams, *Feedback and control systems*, McGraw-Hill, United States of America, 1990.
- [13] J. G. Ziegler, N. B. Nichols, *Optimum Settings for Automatic Controllers*, Transactions of the A.S.M.E. pp. 759-768. 1942.

- [14] P. M. Meshram, R. G. Kanojiya, *Tuning of PID Controller using Ziegler-Nichols Method for Speed Control of DC Motor*, IEEE-ICAESM, pp. 117-122, 2012.