

# Enseñanza de teoría de control basada en proyectos

## Ingeniería Electromecánica con orientación Electrónica

Paulo José Melgarejo Duarte - 43676

**Resumen**— El presente artículo fue realizado con el fin de validar los conocimientos acerca de los sistemas de control clásico, específicamente, el control PID. Para dicho propósito, se construyó una bancada didáctica de pruebas, en la cual se podrá experimentar con una planta específica, en este caso un motor de corriente continua, para el cual se podrá aplicar el control de velocidad y posición del mismo.

**Palabras clave**— Control PID. Sintonización. Motor DC

### I. NOMENCLATURA

VI: (Virtual Instrument) Instrumento Virtual

DC: (Direct Current) Corriente Directa

PWM: (Pulse Width Modulation) Modulación por ancho de pulso.

### II. INTRODUCCIÓN

EN la industria actual, por causa de la alta competitividad, las empresas deben producir con mayor rapidez, a un menor costo y con una mayor calidad, para poder destacarse. Por ello, los procesos industriales tienden a ser cada vez más automatizados, debido a que esto permite que la calidad de la producción sea superior y a su vez sea elaborada en menor tiempo. Modernas plantas industriales en la actualidad tienen sofisticados sistemas de control que constituyen elementos esenciales para su correcta operación.

La Ingeniería de Control ha producido un gran impacto en la sociedad y a medida que pasa el tiempo, nuevos desafíos surgen para la ingeniería de control, por lo cual nuevos sistemas de control actualizados necesitan ser desarrollados, para ello se deberá partir de una base, los sistemas de control clásicos. De ahí la importancia de conocerlos y poder evaluarlos en simulaciones es de gran importancia.

Para poder conocer a profundidad estos sistemas de control clásicos, la aplicación práctica para los estudiantes acerca de estos conceptos es de suma importancia, de ahí la necesidad de contar con las herramientas, en lo posible actualizadas, para su estudio.

### III. DESARROLLO DEL RESUMEN DE TFG

Este trabajo se dividirá en cuatro grandes secciones, siendo los mismos:

Sistemas de control PID, en el mismo se explica su funcionamiento, forma de aplicación y método de sintonización de constantes.

Diseño e implementación de software, en el cual se detalla la forma de implementación y se muestra el código implementado

Diseño e implementación de hardware, donde se detallan los materiales utilizados para la construcción de la base y soportes y los controladores.

Validación de bancada, donde se realizan los experimentos propuestos para esta bancada para comprobar su funcionamiento.

### IV. SISTEMAS DE CONTROL PID

El control automático es el mantenimiento de un valor deseado para una cantidad o condición física, midiendo su valor actual, comparándolo con el valor referencia, y utilizando la diferencia para proceder a reducirla mediante una acción correctiva. En consecuencia, el control automático exige un lazo cerrado de acción y reacción que funcione sin intervención humana [2].

El controlador proporcional-integral-derivado (controlador PID) es un mecanismo de retroalimentación de bucle de control que se utiliza en sistemas de control industrial. Un controlador PID calcula el valor de error como diferencia entre la variable de proceso medida y el punto de ajuste deseado. El controlador intenta reducir el error ajustando el proceso mediante el uso de una variable manipulada [3].

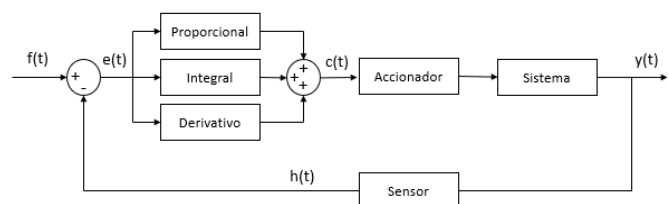


Fig 1. Diagrama de bloques de un control PID

El algoritmo del controlador PID tiene tres parámetros diferentes, es decir, el proporcional, valores integrales y derivados, indicados como P, I y D.

Los miembros de la familia de controladores PID, incluyen tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D). Estos controladores son los denominados P, PI, PD y PID.

P: acción de control proporcional, da una salida del controlador que es proporcional al error, es decir:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (1)$$

Que, descripta desde su función transferencia, queda:

$$C_p(s) = K_p \quad (2)$$

Donde,  $K_p$  es una ganancia proporcional ajustable. Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente (off-set).

I: acción de control integral: da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado, lo que implica que es un modo de controlar lento.

$$u(t) = \frac{K_i}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3)$$

Que, pasando al dominio de “s”, queda:

$$C_i = \frac{K_i}{T_i s} \quad (4)$$

Donde,  $T_i$  se denomina tiempo integral y es quien ajusta la acción integral. La señal de control  $u(t)$  tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error  $e(t)$  es cero. Por lo que se concluye que, dada una referencia constante, o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero.

D: acción de control derivativa: se define mediante:

$$K_d \cdot T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

Que, en “s”, queda:

$$K_d \cdot T_d \cdot s \quad (6)$$

Donde  $T_d$  es una constante de denominada tiempo derivativo. Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador. La acción de control derivativa nunca se utiliza por sí sola, debido a que solo es eficaz durante periodos transitorios.

PID: acción de control proporcional-integral-derivativa, esta acción combinada reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p \cdot T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

Y su función transferencia resulta:

$$C_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d \cdot s\right) \quad (8)$$

Se puede decir que esta ecuación es la versión primitiva o normal de PID, no obstante, hay otras formas alternativas.

#### A. Método de sintonización

El método de sintonización utilizado es el método de Ziegler-Nichols. El criterio de desempeño que seleccionaron fue el de un decaimiento de 1/4, o sea que el error decae en la cuarta parte de un periodo de oscilación. Las ecuaciones fueron determinadas de forma empírica a partir de pruebas realizadas en el laboratorio con diferentes procesos, y están basadas en un modelo de primer orden más tiempo muerto identificado por el método de la tangente, para un funcionamiento del lazo de control como regulador con un controlador PID-Ideal. En cuanto al tipo de controlador, si bien la gran mayoría de los autores indican que este método es para la sintonización de controladores ideales, otros, entre los que destaca Corripio, afirman que este método es para los controladores que interactúan. Las ecuaciones de sintonización de este método están dadas en la siguiente tabla:

TABLA I  
TABLA DE ZIEGLER NICHOLS DE SINTONIZACION

Controlador	Kc	Ti	Td
P	$\frac{\tau}{K_p t_m}$	-	-
PI	$0,9 \cdot \frac{\tau}{K_p t_m}$	$3,33 \cdot t_m$	-
PID	$1,2 \cdot \frac{\tau}{K_p t_m}$	$2 \cdot t_m$	$0,5 \cdot t_m$

#### V. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SOFTWARE

La implementación de los programas fue hecha a través de los productos de National Instruments, el sistema embebido myRIO y el software LabVIEW.

##### A. Control de Velocidad

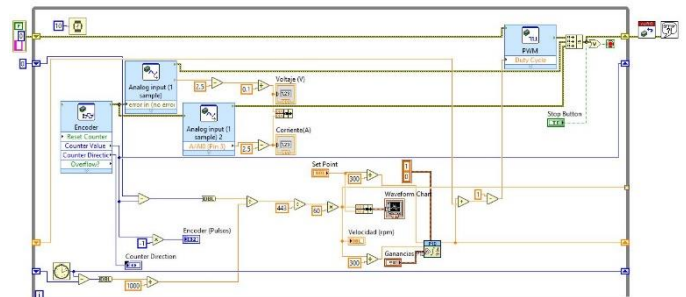


Fig 2. Código fuente del control de velocidad

El entorno de programación LabVIEW provee instrumentos virtuales (VI) ya programados para ciertas funciones, entre ellas están las que ya esta configuradas para su uso con el myRIO. Estos códigos son llamados "subVI".

El código está preparado para contar los pulsos enviados por el encoder del motor, con el subVI Encoder.VI, luego, se convierte la referencia contabilizada de pulsos por vueltas a rpm. El encoder del motor tiene una resolución de 443pulsos por revolución, por lo tanto:

$$Velocidad = \frac{\text{Pulsos por interaccion de bucle}}{\text{tiempo de interaccion de bucle}} \times \frac{1}{443} \times 60$$

Esta señal de referencia pasa a través del bloque PID.VI, el cual compara esta señal con un set point deseado y envía la señal de control corregida, de esta forma se ejerce el control realimentado de la planta.

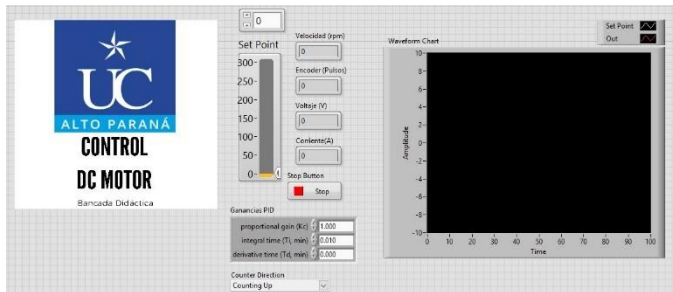


Fig 3. Panel frontal del control de velocidad

El panel frontal cuenta con indicadores de velocidad en rpm, voltaje en volts, corriente en amperes y pulsos, además posee un control de set point gráfico y controles numéricos para hacer variar las constantes del controlador PID. También con un monitor grafico que sirve para observar las señales de set point y señal de salida.

### B. Control de posición

Este VI recoge la información del encoder y la convierte en ángulos, a través de una relación matemática, en donde:

$$\text{Angulo de giro} = \frac{\text{Pulsos} * 360^\circ}{\text{Resolucion del encoder}}$$

Esta señal es comparada con el *set point* establecido en el subVI PID.VI, para que luego el subVI mencionado pueda enviar la señal de control corregida hacia la salida del sistema.

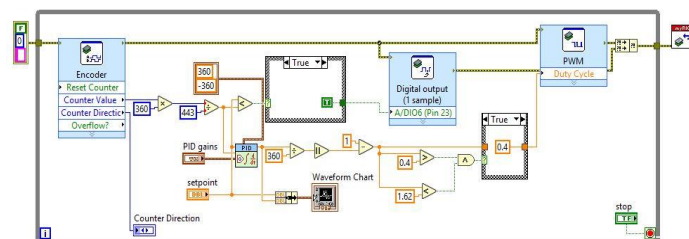


Fig 4. Código fuente del control de posición

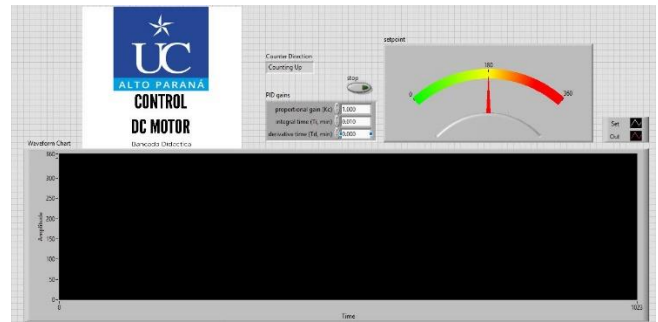


Fig 5. Panel frontal del control de velocidad

El panel frontal cuenta con un control del *set point*, en el cual se ajusta el ángulo deseado, también, como en el control de velocidad, posee un control para poder variar las ganancias de controlador PID.

Una vez sintonizado el controlador, la posición del eje podrá ser comparada con los resultados teóricos obtenidos, tanto gráficamente a través de waveform chart ubicado en el panel frontal, como físicamente observando el puntero del eje del motor.

## VI. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE HARDWARE

Los dispositivos utilizados para la implementación de este proyecto fueron:

- NI myRIO que es un sistema embebido reconfigurable I/O (RIO), dispositivo que, estudiantes pueden usar para diseño de control, robótica, y sistemas mecatrónicos.
- Motor dc de 24v, 600rpm de la marca TSYNI.
- Adaptador de motor Digilent para myRIO, el mismo funciona como un Puente H para el motor, es decir, funciona como un circuito que permite el giro del eje del motor en ambos sentidos, avance y retroceso. Este dispositivo es conectado al puerto de expansión A del myRIO MXP, el cual fue configurado en el código de LabVIEW de acuerdo a las conexiones de pines del mismo.

	33	31	29	27	25	23	21	19	17	15	13	11	9	7	5	3	1
	34	32	30	28	26	24	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2
DIO15 / I2C SDA																	
DIO14 / I2C SCL																	
DIO9 / PWM1																	
DIO8 / PWM0																	
DIO7 / SPI MOSI																	
DIO6 / SPI MISO																	
DIO5 / SPI CLK																	
DIO4																	
DIO3																	
DIO2																	
DIO1																	
DIO0																	
A3																	
A2																	
A1																	
AGND																	
A01																	
A00																	
+5V																	

Fig 6. Configuración de pines del puerto de expansión A del myRIO

La conexión del motor será en el puerto “Motor 0” del adaptador, que ira conectado al puerto de expansión A del myRIO.

Los pines configurados para utilizar en la implementación son el 3 y el 7, que son entradas analógicas que serán utilizadas para tener referencia del voltaje y corriente administrada por la fuente externa de alimentación.



Fig 7. Bancada didáctica

La bancada está hecha de MDF, cuenta con las conexiones físicas para el myRIO y la fuente externa de alimentación.

## VII. VALIDACIÓN DE BANCADA

Para poder validar la bancada de pruebas, se diseñaron dos controladores y fueron aplicados a un motor cd de tal manera a que se pueda contrastar la respuesta en tiempo real y la simulación.

La simulación fue hecha en el entorno de programación de Matlab, en tanto que el control en tiempo real fue hecho en el entorno de programación de LabVIEW, como ya se especificó en capítulos anteriores.

### A. Modelo matemático de la planta

La armadura del motor DC se modela como si tuviera una resistencia constante  $R$  en serie con una inductancia constante  $L$  que representa la inductancia de la bobina de la armadura, y una fuente de alimentación  $v$  que representa la tensión generada en la armadura [4].

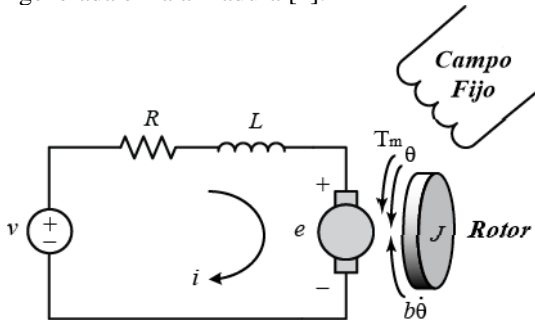


Fig 8. Circuito equivalente de un motor dc

La primera ecuación se realiza haciendo un análisis de la malla del circuito:

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + E_a(t) \quad (7)$$

La ecuación de la sección mecánica viene dada por el modelo:

$$T_m(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) \quad (8)$$

Para poder lograr la interacción entre las ecuaciones anteriores se proponen las siguientes relaciones que asumen que existe una relación proporcional,  $K_a$ , entre el voltaje inducido en la armadura y la velocidad angular del eje del motor.

$$E_a(t) = K_a\omega(t) \quad (9)$$

Y se supone la siguiente relación electromecánica que establece que el torque mecánico es proporcional a la corriente  $K_m$  eléctrica que circula por el motor CD.

$$T_m(t) = K_m i(t) \quad (10)$$

Aplicando la transformada de Laplace para las ecuaciones (7), (8), (9) y (10) se tiene.

$$Lsi(s) = v(s) - Ri(s) - E_a(s) \quad (11)$$

$$Js\omega(s) = T_m(s) - B\omega(s) \quad (12)$$

$$E_a(s) = K_a\omega(s) \quad (13)$$

$$T_m(s) = K_m i(s) \quad (14)$$

Trabajando con las ecuaciones (11), (12), (13) y (14) podemos determinar la función de transferencia.

$$\frac{\omega(s)}{v(s)} = \frac{K_m}{LJs^2 + (RJ + LB)s + RB + K_a K_m} \quad (15)$$

Donde (15) es la función de transferencia de la velocidad angular con relación al voltaje.

Por otro lado, si estamos interesados en conocer la posición del motor de corriente directa DC, basta simplemente con integrar la velocidad angular [4], en otras palabras, simplemente colocamos un integrador a la función de transferencia anterior. Por lo tanto, la ecuación que representa la posición del Motor DC es:

$$\frac{\theta(s)}{v(s)} = \frac{K_m}{s(LJs^2 + (RJ + LB)s + RB + K_a K_m)} \quad (16)$$

A través de mediciones se pudo determinar los valores de las constantes del motor.

$$R = 46,0533 \, \Omega$$

$$K_m = K_a = 0.393$$

$$B = 3,005 \times 10^{-5}$$

$$L = 55,6867 \, \text{mH}$$

$$J = 0,01211 \, \text{kg.m}^2$$

Reemplazando los valores obtenidos en la ecuación (15) obtenemos la función de transferencia para la velocidad y en la ecuación (16) para la posición.

$$\frac{\omega(s)}{v(s)} = \frac{0.3937}{0.0005569s^2 + 4.605s + 0.001567} \quad (17)$$

$$\frac{\theta(s)}{v(s)} = \frac{0.3937}{0.0005569s^3 + 4.605s^2 + 0.001567s} \quad (18)$$

### B. Resultados

TABLA 2  
RESPUESTAS OBTENIDAS PARA EL CONTROL DE VELOCIDAD

	Simulación	Control Real
Sobrepaso	1.54%	1.65%
Tiempo de subida	1.68 seg	1.65 seg
Tiempo de asentamiento	2.71 seg	4.78 seg

TABLA 3  
RESPUESTAS OBTENIDAS PARA EL CONTROL DE POSICION

	Simulación	Control Real
Sobrepaso	10.5%	6%
Tiempo de subida	7.25 seg	5.02 seg
Tiempo de asentamiento	4.78 seg	1 seg

## VIII. CONCLUSIONES

El presente trabajo consistió en el diseño e implementación de una bancada didáctica portátil, de bajo costo, para las prácticas de laboratorio de automatización. Para dicho propósito se realizó una investigación para determinar que planta sería la más adecuada para la implementación de este proyecto y cual sistema de control automático sería el adecuado para el propósito ya mencionado.

El control PID fue el sistema de control elegido, debido a su simplicidad y facilidad de entendimiento, además de su amplia utilización en el campo industrial actual.

Partiendo de eso se decidió que la planta a controlar sería un motor cd, debido a su disponibilidad en el mercado y a su variedad de usos en las distintas áreas de la ingeniería y automatización. Además, cabe destacar que, para el propósito de crear una bancada de bajo costo, este tipo de motores se adaptan perfectamente a los requerimientos del proyecto, debido a la variedad de precios encontrados en el mercado y a su facilidad de manejo.

Se optó por el entorno de programación de LabVIEW, debido a su biblioteca virtual que cuenta con una amplia gama de instrumentos virtuales, además también debido a la practicidad de conexión del sistema embebido myRIO, elemento que justamente tiene como finalidad la experimentación con fines didácticos.

Se pudo contrastar los conocimientos de sistemas de control gracias a los ensayos de laboratorio creados para la implementación de este proyecto, que son los controles de posición y velocidad del motor cd. Ambos experimentos, para las diferentes situaciones propuestas, pudieron validar los conocimientos teóricos acerca de la teoría de control.

## IX. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Åström, K., Apkarian, J., & Lachery, H. (2005). DC Motor Control Trainer (DCMCT). *USB QICii Laboratory Workbook*.
- [2] Kuo, B. (1996). *Sistemas de Control Automático*. Illinois: Prentice Hall.
- [3] Kant, M. (2014). Análisis comparativo del control de velocidad de un motor DC usando varios métodos de ajuste. Punjab.
- [4] Ogata, K. (1992). *Dinámica de Sistemas*. Minnesota: Prentice Hall.
- [5] Dominguez, D., Ulloa, R., Valencia, D., & Zaragoza, D. (2007). Control de un motor por medio de PWM para procesos de velocidad (Tesis de Grado). *Control moderno aplicado a máquinas eléctricas rotatorias y a sistemas automatizados*. Mexico D.F.
- [6] López, A., Miller, J., Smith, C., & Murril, P. (1967). Tuning Controllers with Error-Integral Criteria. *Instrumentation Technology*, 14, 57-62.
- [7] Perez, M., Perez Hidalgo, A., & Perez Berenguer, E. (2008). Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo. *Facultad de Ingeniería, Departamento de Electrónica y Automática, Universidad Nacional de San Juan*.
- [8] Universidad Carnegie Mellow. (s/f). *Introduction: System Modeling*. Recuperado el 12 de mayo de 2019, de Control Tutorial for Matlab & Simulink: <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction&section=SystemModeling#2>
- [9] Alfaro Ruíz, V. (2002). Métodos de sintonización de controladores PID que operan como reguladores. *Revista Ingeniería*, 12(1-2), 21-36.
- [10] Pinzón Ardila, O. (2010). Estado actual y futuro de la ingeniería de control. *Puente*, 4(2), 7-15.