

Control de velocidad PI a un motor de DC utilizando herramientas Open Source

VERGARA-BETANCOURT, Angel* †, SALAZAR-HIDALGO, Eduardo, RAMIRO-JUÁREZ, José De Jesús y RAMIRO-RAMIRO, José

C.A, Instrumentación y Control, Div. Ing. Mecatrónica, Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla. Carr. Acuaco-Zacapoaxtla, Km 8, Col. Totoltepec, Zacapoaxtla, Puebla. C.P. 73680

Recibido Agosto 04, 2017; Aceptado Febrero 02, 2017

Resumen

En este artículo, se reporta el diseño e implementación de un controlador PI para regular la velocidad de un motor de DC. A partir de la respuesta del motor ante una entrada escalón, se observa la respuesta en lazo abierto y lazo cerrado y se determinan los parámetros a regular. La atenuación en la ganancia y la velocidad en respuesta, sugieren la implementación de un controlador clásico PI. Los parámetros de ganancia del controlador proporcional y controlador Integral, se calculan mediante la técnica de reubicación de polos y ceros. Con los valores calculados anteriormente, se diseña el controlador y se simula mediante las herramientas Open Source de Scilab/Xcos y con interfaz mediante Arduino. La respuesta observada en simulación corresponde con lo deseado y permite ajustar los valores de las ganancias, para implementar físicamente en un sistema de motor de DC. Los resultados obtenidos permiten mantener constante la velocidad del motor dependiendo los valores previamente establecidos, incluso para perturbaciones externas o cambios en la entrada de excitación.

Control PI, Reubicación de polos y ceros, Motor DC, Scilab/Xcos, Arduino

Abstract

In this article, we report the design and implementation of a PI controller to regulate the speed of a DC motor. From the response of the motor to a step input, the response in open loop and closed loop is observed and the parameters to be regulated are determined. The attenuation in the gain and the speed in response, suggest the implementation of a classic PI controller. The gain parameters of the proportional controller and Integral controller are calculated using the poles and zeros relocation technique. With the previously calculated values, the controller is designed and simulated using the Open Source tools of Scilab / Xcos and with interface through Arduino. The observed response in simulation corresponds to the desired and allows to adjust the values of the gains, to implement physically in a DC motor system. The results obtained allow to keep the motor speed constant depending on the previously established values, even for external disturbances or changes in the excitation input.

PI Control, Zero-Pole Relocation, DC Motor, Scilab/Xcos, Arduino

Citación: VERGARA-BETANCOURT, Angel, SALAZAR-HIDALGO, Eduardo, RAMIRO-JUÁREZ, José De Jesús y RAMIRO-RAMIRO, José. Control de velocidad PI a un motor de DC utilizando herramientas Open Source. Revista de Tecnología e Innovación 2017, 4-11: 1-13

* Correspondencia al Autor (Correo electrónico: a.vergara@live.itsz.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer Autor.

Introducción

En la actualidad, los sistemas de control son parte fundamental de la automatización de procesos (Arántegui, 2011), y a pesar de que en las últimas décadas se han desarrollado nuevas estrategias de control, tales como control moderno (Ogata, Sistemas de control en tiempo discreto, 1996), (Sandoval, 2016), control difuso (Kevin M. Passino, 1998), (Mandujano-Venegas, 2016), control adaptivo (Francisco Rodríguez Rubio, 1996), control óptimo, control mediante redes neuronales, etc. El control clásico PID (Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 2010), (Ezeta, 2013), aún sigue siendo el más utilizado en la industria y otros campos de la ingeniería (Manfred Schleicher, 2003), esto debido a su sencillez, costo y fácil implementación.

En lo que respecta al campo de control de motores de DC, el control clásico sigue siendo una alternativa accesible que permite el diseño de controladores para regular posición y velocidad de forma inmediata e intuitiva (Henández, 2015). La implementación es sencilla y requiere componentes de bajo costo en el caso de controladores analógicos o bien de hardware-software al alcance de la mayoría, ya sea privativo o bien “*open source*”, si se trata de controladores digitales.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un sistema de control al motor de DC EMG49, con ayuda de herramientas “*open-source*”, en este caso Scilab/Xcos y Arduino. Para este propósito, el trabajo que aquí se presenta, muestra en primer lugar y a través de la función de transferencia (F.T.), el modelo matemático del moto-reductor EMG49, el cual ha sido obtenido experimentalmente y discutido en otros trabajos (Vergara Betancourt, Salazar Hidalgo, & Zapata Nava, 2017).

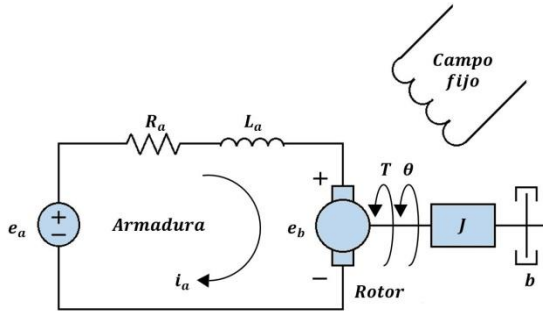
Posteriormente se analiza mediante simulación la respuesta en velocidad, tanto en lazo abierto como en lazo cerrado y considerando perturbaciones al sistema. En base a los resultados observados se realiza una revisión de los sistemas de control clásico, y sus efectos en los rubros de estabilidad, ganancia y sensibilidad de la respuesta. Sustentados en las observaciones, se prosigue a diseñar y sintonizar el sistema de control correspondiente utilizando el método de reubicación de polos y ceros y se exponen los resultados en simulación como en respuesta real del desempeño del sistema ante cambios en la entrada y cuando este es perturbado de forma externa.

A continuación se implementa de manera física el sistema del motor de DC en lazo abierto y lazo cerrado utilizando herramientas “*open source*” (Scilab/Xcos y Arduino) y se observa su respuesta transitoria y en estado estable ante una perturbación escalón. Los resultados obtenidos demuestran que un control PI correctamente sintonizado es capaz de mantener la velocidad establecida al motor aun cuando existen perturbaciones que tienden a modificarla. Los alcances de este trabajo permitirán en un futuro implementar sistemas que requieran regular y mantener determinada velocidad en sistemas que se hallen en constante perturbación, tales como bandas transportadoras, robots móviles, impresoras 3D, seguidores solares, etc.

Modelo Matemático del Motor de DC

El primer paso para diseñar un sistema de control, es determinar el comportamiento dinámico de la planta a controlar, es decir, conocer su modelo teórico, en este caso, la F.T. de un motor de DC controlado por armadura.

Para el caso del motor representado por la figura 1, la función de transferencia en lazo abierto que relaciona la posición angular $\theta(t)$ del eje del motor como variable de salida, respecto al voltaje de armadura $e_a(t)$ como variable de entrada, queda definida por la ecuación 1 (Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 2010).



por armadura

Fuente: Diseño propio, basado en (Nise, 2004)

Figura 1 Diagrama de cuerpo libre de un motor de DC controlado

$$\frac{\Theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{s[(R_a + sL_a)(Js + b) + KK_b]}; \quad (1)$$

Donde K es la constante del par del motor, K_b es la constante de la fuerza contra-electromotriz del motor, R_a es la resistencia de armadura, L_a es la inductancia de armadura y será considerada despreciable para fines prácticos, J es el momento de inercia del motor, carga y tren de engranes y b es el coeficiente de fricción viscosa también de la combinación de motor, carga y tren de engranes.

Tomando en cuenta de que lo que se requiere es la F.T. que relacione la velocidad angular $\omega(t)$ de salida del motor respecto al voltaje de entrada $e_a(t)$, entonces, si se considera que $\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}$, en el dominio de Laplace $\Omega(s) = s\Theta(s)$, por lo que la F.T. al despreciar L_a ahora se describe por la ecuación 2.

$$\frac{\Omega(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{R_a(Js + b) + KK_b}; \quad (2)$$

Esta ecuación puede reescribirse a una forma más simple e intuitiva, si se realizan algunas simplificaciones tales como: $B = \left(b + \frac{KK_b}{R_a}\right)$, $K_m = \frac{K}{R_a B}$, y $T_m = \frac{J}{B}$. Por lo cual la F.T. se reduce a la expresión de la ecuación 3.

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{T_m s + 1}; \quad (3)$$

La expresión anterior es característica de sistemas de primer orden, donde K_m representa la ganancia del sistema y T_m la constante de tiempo en el cual se logra alcanzar el 63.2% de salida total. Para diferentes valores de T_m , el sistema presenta comportamientos dinámicos como los descritos en el gráfico 1.

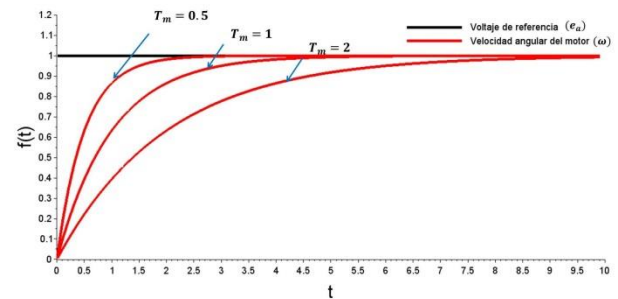


Gráfico 1 Respuesta dinámica del modelo del motor de DC para diferentes constantes de tiempo (T_m)

Fuente: Diseño propio

Respuesta en velocidad del motor de DC EMG49

Respuesta en Lazo Abierto

Para la mayoría de los motores los parámetros K_m y T_m de la expresión (3) son desconocidos y por lo tanto, no es posible conocer la respuesta exacta del motor. Para el caso específico de interés en este trabajo, la F.T. en lazo abierto del motor EMG49 (figura 2), ha sido obtenida con anterioridad (Vergara Betancourt, Salazar Hidalgo, & Zapata Nava, 2017) y está representada por la ecuación 4.

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{E_a(s)} = \frac{143}{0.115s + 1} e^{-0.05s}; \quad (4)$$

La F.T. de la ecuación (4) se simula utilizando Xcos, considerando una entrada escalón unitario, que corresponde a una alimentación de 24V. Los resultados que se obtienen se presentan en el gráfico 2.

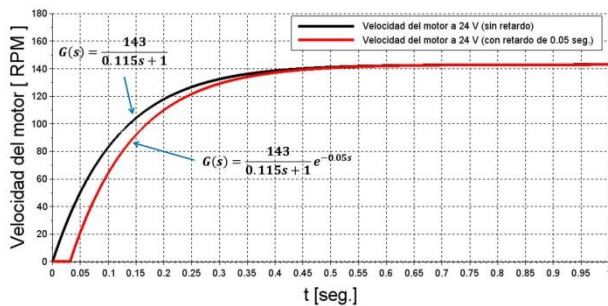


Gráfico 2 Respuesta dinámica del modelo del motor EMG49 considerando la expresión con retardo y sin retardo

Fuente. Diseño propio

En la gráfica 2 se puede apreciar, que al aplicar un voltaje máximo al motor $E_a(s) = 24 V$, la velocidad de salida que se alcanza $\Omega(s)$ es de aproximadamente 140 RPM, velocidad que está determinada por la ganancia $K_m = 143$ y que se comprueba experimentalmente. Por otra parte, para alcanzar dicha velocidad, se requiere de aproximadamente 0.5 segundos.

También se puede apreciar que el término de retardo de la ecuación 4, no afecta la curva de respuesta del sistema, salvo por el retardo en el tiempo de carga, por lo que puede omitirse en los análisis subsecuentes y contemplar solo una respuesta de primer orden en lazo abierto, como el representado por la figura 2 y expresada por la ecuación 3. De esta manera $K_m = 143$ y $T_m = 0.115$ seg.

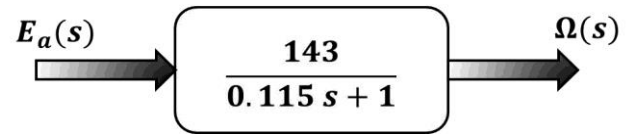


Figura 2 Diagrama a bloques en lazo abierto del motor EMG49

Fuente: Diseño propio

Respuesta en Lazo Cerrado

Con el propósito de controlar un sistema, es necesario que este sea realimentado, para comparar salida respecto a entrada, para ello, es necesario representar la entrada por medio de una velocidad de referencia, es decir, $\Omega_R(s)|_{E_a(s)=24V}$, de esta manera el diagrama de bloques en lazo cerrado queda descrito por la figura 3.

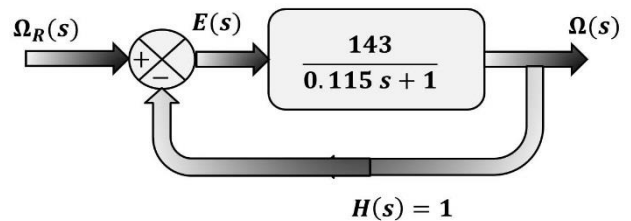


Figura 3 Diagrama a bloques en lazo cerrado del motor EMG49 con retroalimentación unitaria

Fuente: Diseño propio

Al realimentar el sistema, la velocidad de salida es comparada con la velocidad de entrada y se produce una señal de error $E(s) = \Omega_R(s) - \Omega(s)$. Esta señal de error por realimentación genera efectos sobre el desempeño del sistema (Kuo, 1996), ya sea incrementando o disminuyendo la ganancia global del sistema (velocidad), reduciendo la estabilidad del sistema, afectando la sensibilidad y contribuyendo a reducir los efectos de perturbaciones externas. Para efecto de análisis, la F.T. del motor será normalizada a la velocidad máxima, y la respuesta queda expresada en unidades normalizadas (u.n.), así que la ganancia de referencia para las simulaciones subsecuentes, será la unidad.

Por lo tanto, la F.T. de la ecuación 4, sin el término de retardo queda descrita por la ecuación 5.

$$G_n(s) = \frac{\Omega(s)}{\Omega_R(s)} = \frac{1}{0.115s + 1}; \quad (5)$$

De esta manera, un sistema realimentado queda descrito por la ecuación 6.

$$G_R(s) = \frac{G_n(s)}{1 + G_n(s)H(s)}; \quad (6)$$

Así y aplicando la ecuación (5), con una realimentación unitaria ($H(s) = 1$), la F.T. del motor en lazo cerrado queda descrita por la ecuación 7.

$$G_R(s) = \frac{1}{0.115s + 2}; \quad (7)$$

Al comparar mediante simulación la respuesta normalizada en lazo abierto (ecuación 5) con la respuesta normalizada en lazo cerrado (ecuación 7), se puede observar que la realimentación afecta inicialmente la ganancia y reduce la velocidad de salida, lo cual produce un error en estado estacionario (e_{ss}) del 50% en referencia a la velocidad deseada tal y como se aprecia en el gráfico 3.

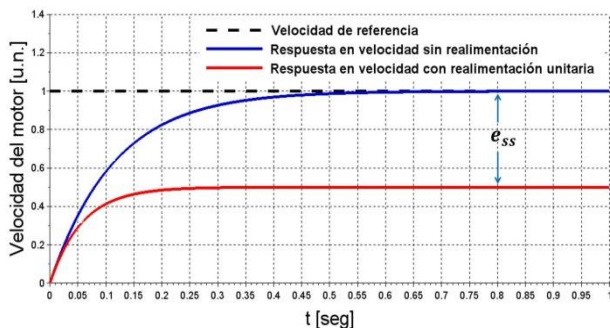


Gráfico 3 Respuesta dinámica del modelo del motor EMG49 cuando el sistema es realimentado con ganancia unitaria

Fuente: Diseño propio

Con los resultados antes mostrados, se plantea la necesidad de integrar al sistema un bloque que permita regular la velocidad a la salida y reducir el e_{ss} de tal forma que se mantengan las 140 RPM originales, a pesar de que el sistema sea realimentado.

Respuesta ante perturbaciones externas

Otro caso de estudio es cuando el sistema es perturbado con una señal externa, (figura 4), ya sea por una variación eléctrica o por una carga mecánica que modifique las revoluciones del motor (e_{ss}), por ejemplo en un 10% adicional a la salida del sistema realimentado, como se puede observar en el gráfico 4.

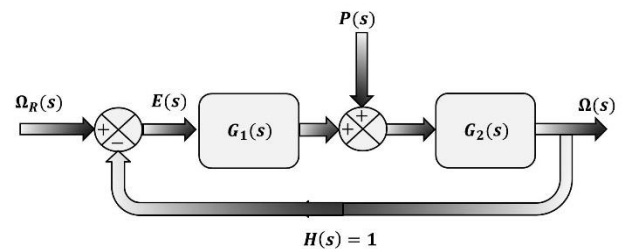


Figura 4 Diagrama a bloques en lazo cerrado del motor EMG49 con retroalimentación unitaria y perturbación externa

Fuente: Diseño propio

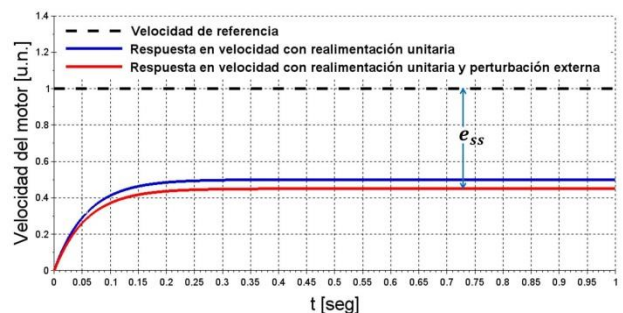


Gráfico 4 Respuesta dinámica del modelo del motor EMG49 cuando el sistema es realimentado con ganancia unitaria y está sujeto a una perturbación externa. Existe un error en estado estable

Fuente: Diseño propio

Bajo esta circunstancia, también es necesario, implementar un bloque que compense estas variaciones y elimine o al menos reduzca el e_{ss} y mantenga constantes las RPM establecidas por el usuario para todo instante de tiempo. Además de que este bloque también debe permitir regular la respuesta transitoria, de tal manera que responda en tiempos cortos, evite grandes oscilaciones y mantenga la estabilidad del sistema.

Acciones de Control

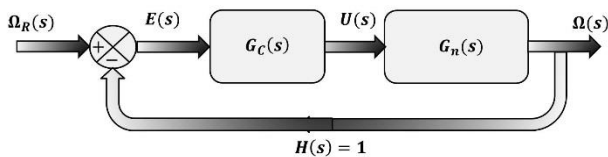


Figura 5 Diagrama a bloques en lazo cerrado del motor EMG49 con retroalimentación unitaria y con la inserción de un bloque de control ($G_C(s)$)

Fuente: Diseño propio

El bloque que se integra al sistema para regular la velocidad, es un bloque de control ($G_C(s)$), como se muestra en la figura 5.

Con la inserción de este bloque de control, la F.T. de lazo cerrado se modifica según la ecuación 8.

$$G_{CR}(s) = \frac{G_C(s)G_n(s)}{1 + G_C(s)G_n(s)H(s)}; \quad (8)$$

Para el caso de control clásico, este bloque $G_C(s)$, podría ser uno de los modos de control y sus F.T. que se están descritas en la literatura (Kuo, 1996), (Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 2010), tales como: control proporcional – P (ecuación 9), control integral – I (ecuación 10), la combinación de controles proporcional-integral – PI (ecuación 11), o el control proporcional-integral-derivativo – PID (ecuación 12).

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p; \quad (9)$$

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s}; \quad (10)$$

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right); \quad (11)$$

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right); \quad (12)$$

Donde K_p , es la ganancia proporcional, $T_i = K_p/K_i$, es el tiempo integral y $T_d = K_d/K_p$ es el tiempo derivativo y pueden ser constantes ajustables que definen la acción y tipo de respuesta del sistema controlado.

Diseño y sintonización del controlador PI por ubicación algebraica de polos

Después de varios experimentos mediante simulación (gráficos 6 al 7), utilizando la F.T. en lazo cerrado sin control (ecuación 7) y lazo cerrado con controlador (ecuación 8) y aplicando sintonización heurística de controladores, se determinó que el controlador que mejor respuesta ofrece y que no lleva a inestabilidad al sistema, es el control PI.

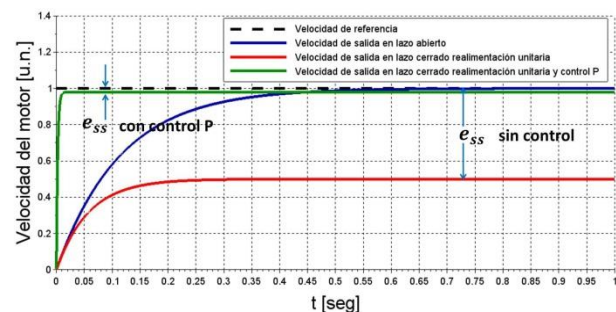


Gráfico 5 Respuesta dinámica del modelo del motor EMG49 cuando el sistema es realimentado con ganancia unitaria y se agrega un controlador tipo P. El error en estado estable se reduce

Fuente: Diseño propio

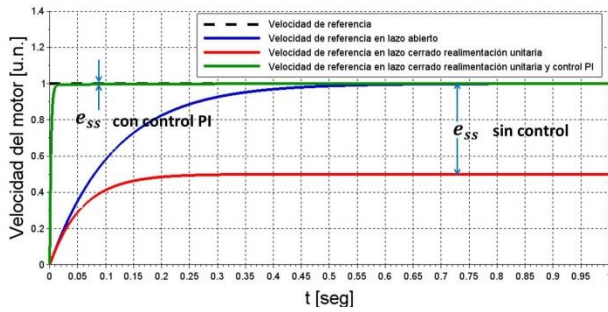


Gráfico 6 Respuesta dinámica del modelo del motor EMG49 cuando el sistema es realimentado con ganancia unitaria y se agrega un controlador tipo PI. El error en estado estable se elimina
Fuente: Diseño propio

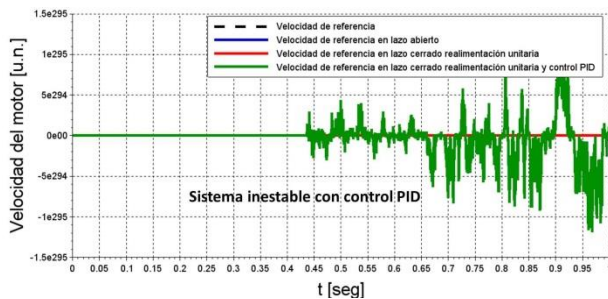


Gráfico 7 Respuesta dinámica del modelo del motor EMG49 cuando el sistema es realimentado con ganancia unitaria y se agrega un controlador tipo PID. El sistema se vuelve inestable
Fuente: Diseño propio

Con los resultados anteriormente mostrados se propone agregar un bloque de control con la F.T. correspondiente al control PI, tal y como se muestra en la figura 6.

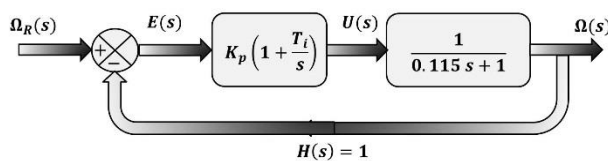


Figura 6 Esquema de Control PI para regular la velocidad del motor EMG49
Fuente: Diseño propio

De tal manera que la F.T. en lazo cerrado correspondiente (ecuación 8), sustituyendo los valores de la F.T. del motor, se reduce a la ecuación 13.

$$G_{CR}(s) = \frac{143(K_p s + K_i)}{0.115s^2 + (1 + 143K_p)s + 143K_i}; \quad (13)$$

El sistema en lazo cerrado tiene la forma de un sistema de segundo orden, cuya F.T. canónica es representada por la ecuación 14, sin considerar el cero de la expresión.

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}; \quad (14)$$

La ubicación de los polos en el plano complejo, de la ecuación 14, determinan la estabilidad del sistema, como se observa en la figura 7 (Patiño, 2016).

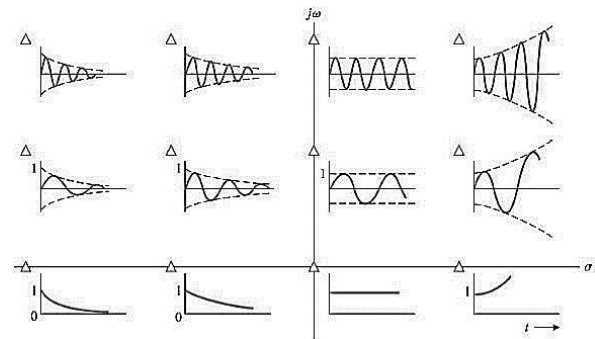


Figura 7 Estabilidad de sistemas en el plano complejo ante una entrada impulso
Fuente: (Patiño, 2016)

Polos en el semiplano izquierdo del plano s, aseguran la estabilidad del sistema, mientras que polos en el semiplano derecho, producen un sistema sería inestable, y polos sobre el eje imaginario, determinan un sistema críticamente estable.

Los parámetros que definen la expresión de la ecuación 14 están descritos en la tabla 1. Representan la ubicación de polos y ceros en el plano complejo. Por otro lado, su respuesta transitoria se muestra en el gráfico 8.

Parámetro	Relación matemática
Frecuencia natural del sistema	ω_0
Factor de Amortiguamiento	$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\pi^2}{\ln^2(M_p)}}}$;
Frecuencia natural amortiguada	$\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}$;
Tiempo de levantamiento	$t_r = \frac{1}{\omega_d} \arctan\left(\frac{-\omega_d}{\zeta\omega_0}\right)$;
Tiempo pico	$t_p = \frac{\pi}{\omega_d}$;
Sobre paso máximo	$M_p = e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$;
Tiempo de establecimiento (criterio del 2% y del 5%)	$t_s(2\%) = \frac{4}{\zeta\omega_0}$; $t_s(5\%) = \frac{3}{\zeta\omega_0}$;

Tabla 1 Parámetros característicos en la curva de respuesta transitoria de un sistema sub-amortiguado
Fuente: (Ezeta, 2013)

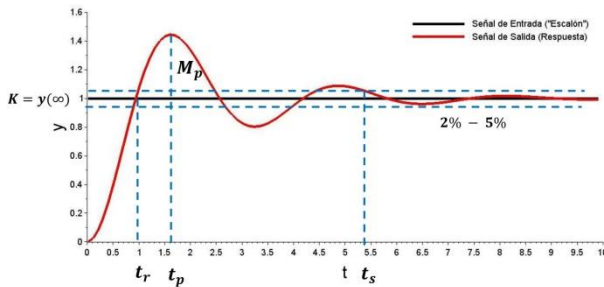


Gráfico 8 Parámetros que definen la respuesta transitoria del sistema controlado
Fuente: Diseño propio

A continuación se procede al diseño del controlador de velocidad, para ello en la tabla 2 se proponen condiciones que debe cumplir la respuesta transitoria del sistema controlado:

Parámetro	Condición
Tiempo de establecimiento	$t_s(2\%) < 1 \text{ seg}$
Tiempo pico	$t_p < 0.5 \text{ seg}$
Sobrepaso máximo	$M_p < 20 \%$

Tabla 2 Parámetros que se desean cumplir en la curva de respuesta transitoria del sistema controlado
Fuente: Diseño propio

Considerando las condiciones de la tabla 2, se procede al cálculo de las constantes K_p y T_i , para lo cual, se utilizó el método algebraico de reubicación de polos en el plano complejo.

Utilizando las ecuaciones 13 y 14, se obtienen las relaciones entre las ganancias de control y la ubicación deseada de los polos determinados por σ y ω_d (ecuación 15 y 16).

$$\frac{1 + 143K_p}{0.115} = 2\zeta\omega_n = 2\sigma; \tag{15}$$

$$\frac{143K_i}{0.115} = \omega_n^2 = \sigma^2 + \omega_d^2; \tag{16}$$

De las expresiones anteriores se obtienen los valores: $\sigma > 4$, $\omega_d > 6.28$ y $\zeta > 0.45$. Con esto, y considerando que $\zeta = \cos(\beta)$, se calcula que $\beta < 62.3^\circ$. Todos estos parámetros de grafican y se muestran en el gráfico 9.

En relación con el gráfico 9, se eligieron los polos en lazo cerrado igual a $-7 \pm 7j$ los cuales se encuentran dentro del área que cumple con las especificaciones del sistema. Se tomara el valor absoluto de dichos polos para despejar los valores de K_p y K_i . Por lo tanto $\sigma = 7$ y $\omega_d = 7$, de esta manera y mediante las sustituciones pertinentes, se obtienen las constantes del controlador: $K_p = 0.0042$ y $K_i = 0.078$.

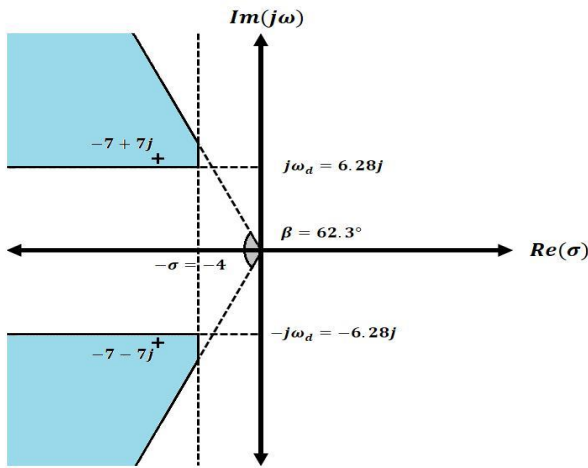


Gráfico 9 Parámetros de la respuesta deseada descritos en el plano complejo. El área en azul, contiene los valores que satisfacen los requerimientos de estado transitorio establecidos

Fuente: Diseño propio

Implementación del sistema de control

El sistema que se va a controlar como se ha mencionado anteriormente, es un motor de DC EMG49, el cual tiene una velocidad nominal de 122 RPM cuando es alimentado con una fuente de 24 V. Para la implementación del sistema de control, el motor es conectado a la computadora a través de la tarjeta Arduino Uno como se esquematiza en la figura 8.

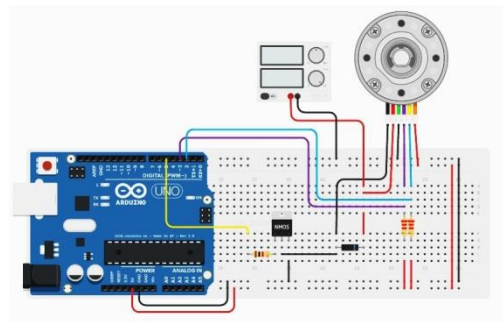


Figura 8 Esquema de conexiones entre el motor y la computadora, utilizando como interfaz la tarjeta Arduino Uno

Fuente: Diseño propio

El sistema de control se diseña utilizando Xcos y se basa en el modelo de la figura 9.

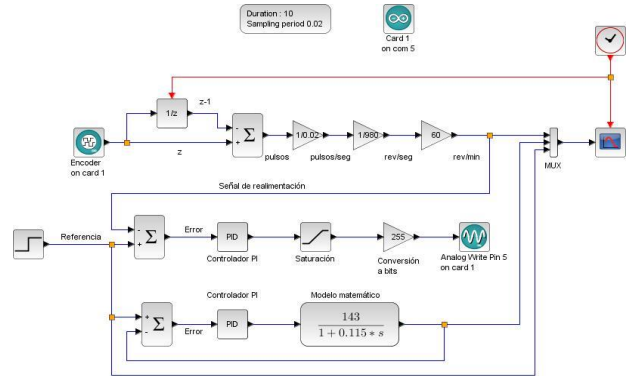


Figura 9 Modelo en Xcos de Scilab para la implementación del controlador PI de un motor de DC EMG49 con interfaz mediante Arduino Uno

Fuente: Diseño propio

El modelo de la figura 9, permite implementar y observar la respuesta del sistema físico con y sin la integración del sistema de control, así como comparar la respuesta simulada utilizando el la F.T. que describe a este sistema.

El sistema implementado permite que a través de pulsos PWM, se proporcione voltaje al motor. De esta manera, al introducir los valores de K_p y K_i calculados previamente en el bloque PID, se modifica el porcentaje del ciclo de trabajo de los pulsos PWM, consecuentemente, la velocidad también se modifica y según disminuya o se incremente el controlador PI permitirá regular la velocidad del motor. La velocidad se regula según la referencia establecida y para los experimentos presentados en este reporte, la referencia es de 100 rpm.

Resultados

Utilizando el modelo de la figura 9, se implementó y comprobó la respuesta del sistema con la integración del control PI. Los resultados experimentales obtenidos se muestran en los gráficos 10, 11 y 12.

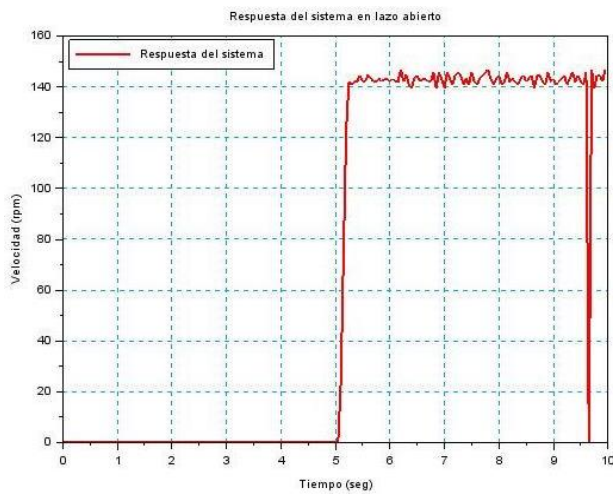


Gráfico 10 Respuesta experimental de la velocidad del motor EMG49, en lazo abierto y sin control cuando al sistema se le indica un “set point” de 140 RPM
Fuente: Diseño propio

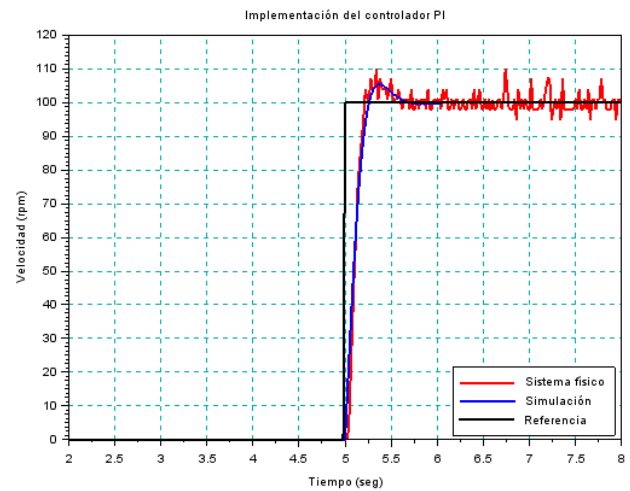


Gráfico 12 Respuesta experimental de la velocidad del motor EMG49, en lazo cerrado con control PI cuando al sistema se le indica un “set point” de 100 RPM
Fuente: Diseño propio

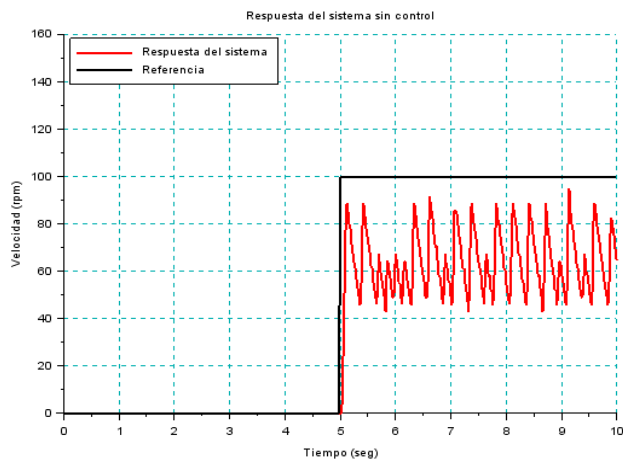


Gráfico 11 Respuesta experimental de la velocidad del motor EMG49, en lazo cerrado y sin control cuando al sistema se le indica un “set point” de 100 RPM
Fuente: Diseño propio

Como se puede apreciar en el gráfico 12, la velocidad establecida se mantuvo a pesar de que el sistema se halla realimentado.

Es importante hacer notar que las curvas que representan la respuesta del sistema en físico, y representadas en color rojo, de los gráficos 10, 11, 12 y subsecuentes, presentan un comportamiento no suavizado, esto se debe a efectos de ruido y variaciones en la corriente de salida al motor y que no se consideraron o se despreciaron en el modelo teórico y que condujeron a la construcción del modelo de simulación (líneas en color azul).

De igual manera se realizaron otras pruebas considerando diferentes valores de referencia en la velocidad de salida. Los resultados se presentan en el gráfico 13.

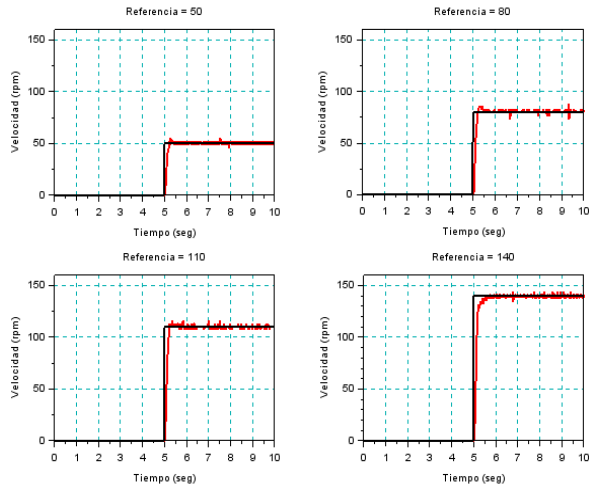


Gráfico 13 Respuesta experimental de la velocidad controlada del motor EMG49, ante diferentes valores de referencia

Fuente: Diseño propio

Al igual que en el primer caso, la velocidad del motor que se establece se alcanza en un tiempo mínimo y se mantiene, logrando un error en estado estacionario prácticamente nulo. Otra de las pruebas que se hicieron, es cuando el sistema es perturbado por una señal externa, como se explicó en la figura 4.

En este caso, esta perturbación se simula, intentando detener el avance del motor, aplicando un torque en sentido contrario al del giro del motor, lo que implicaría una reducción en la velocidad del mismo. Sin embargo, con la inclusión del control PI, la velocidad logra mantenerse, como se aprecia en el gráfico 14.

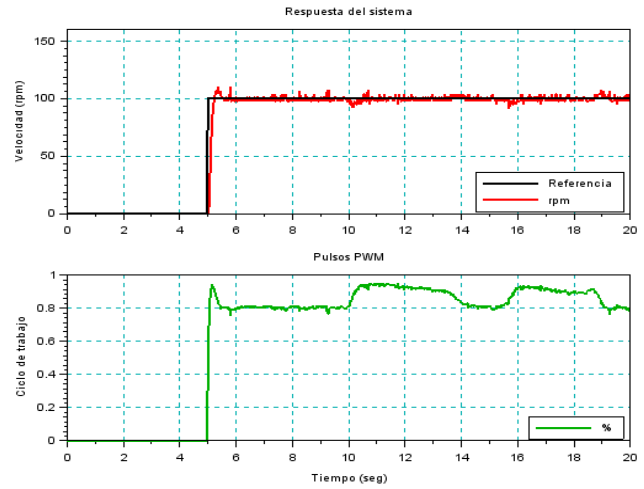


Gráfico 14 Respuesta experimental de la velocidad del motor EMG49, en lazo cerrado con control PI (en rojo) cuando al sistema es perturbado con una entrada externa. La velocidad de 100 RPM se logra mantener gracias a un incremento en la corriente del motor (en verde) que permite compensar las pérdidas debidas a la perturbación

Fuente: Diseño propio

En la parte superior del gráfico 14 se puede observar que el motor mantiene la velocidad de referencia que en este caso es de 100 rpm a pesar de la perturbación aplicada. En la parte inferior de esta gráfica, se observa como el porcentaje de los pulsos PWM aumenta cuando la perturbación es aplicada, es decir, el sistema aumenta el voltaje aplicado al motor y con ello la corriente que permite contrarrestar la carga externa.

Conclusión

El desarrollo de este proyecto, implicó una serie de retos, entre los cuales se encuentran, el análisis de la respuesta del sistema, la integración de software y hardware “open source”, el cálculo de los parámetros del controlador y la implementación experimental del sistema. Sin embargo, al final el controlador propuesto y que fue implementado permitió controlar la velocidad del motor a un valor de “set point” definido por el usuario.

Para el caso que aquí se ha presentado, este valor ha sido de 100 rpm, sin embargo, se puede variar desde una velocidad de 1 rpm hasta una velocidad nominal máxima del motor de 143 rpm. De esta manera, el motor es capaz de alcanzar la velocidad de referencia incluso si hubiese alguna perturbación, es decir, el sistema automáticamente se encarga de eliminar el error para mantener la referencia establecida.

Por otra parte, se concluye también que el modelo experimental que se tiene, representa una aproximación muy adecuada al modelo ideal. A pesar de que existen algunas diferencias, principalmente derivadas de efectos de ruido y/o despreciar términos de fricción y otros factores, este modelo permite diseñar un sistema de control y los resultados obtenidos son muy adecuados a lo que se esperaba obtener. Con el control de velocidad del motor se pueden pensar en distintas aplicaciones. Por ejemplo, la implementación del motor a una banda transportadora para regular la velocidad de la misma, cuando una perturbación externa (objeto de mayor peso puesto sobre ella), tienda a reducir la velocidad, o bien, un sistema de robot móvil, donde una pendiente pueda inducir a incrementar o reducir la velocidad del mismo. Con el sistema de control, se espera que estas variaciones de velocidad sean compensadas y se logre tener sistemas estables, fiables y de alta precisión.

Agradecimientos

Los autores agradecen al TecNM, así como al PRODEP por el apoyo recibido para la ejecución de proyectos y por respaldar el trabajo de CA's, en particular el del CA de Instrumentación y Control, ya que permiten el desarrollo de investigación e integración de alumnos para estas actividades. De igual manera le agradecen al ITS Zacapoaxtla, ya que a través del financiamiento para proyecto con registro PLIM-17-03, se han logrado los resultados aquí reportados.

Referencias

- Arántegui, J. (2011). *Control de procesos*.
- Burns, R. S. (2001). *Advanced Control Engineering*. Butterworth Heinemann.
- Ezeta, R. F. (2013). *Análisis y Diseño de Sistemas de Control Digital*. Mexico, D.F.: McGraw-Hill.
- Francisco Rodríguez Rubio, M. J. (1996). *Control Adaptivo y Robusto*. España: Universidad de Sevilla.
- Geir E. Dullerud, F. G. (s.f.). *A Course in Robust Control Theory*. Springer.
- Guillén, M. E. (2017). *Escuela de Ingeniería Electrónica Tecnológico de Costa Rica*. Recuperado el 2016, de Escuela de Ingeniería Electrónica Tecnológico de Costa Rica: <http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/Laboratorio/3.7Identificacion%20de%20sistemas.PDF#page=1&zoom=auto,-107,248>
- Hernandez-Carlos, Peza-Edebaldo, Garcia-Enrique, Torres-José. Simulación de los Sistemas de Control Proporcional Derivativo y Proporcional Integral Derivativo de un Servomecanismo de segundo orden bajo la plataforma de LabVIEW. *Revista de Tecnología e Innovación* 2015, 2-4:688-700.
- K.M. Hangos, J. B. (2004). *Analysis and Control of Nonlinear Process Systems*. Springer.
- Kevin M. Passino, S. Y. (1998). *Fuzzy Control*. Addison-Wesley Longman, Inc.
- Kunusch, C. (2003). *Identificación de Sistemas Dinámicos. Cátedra de Control y Servomecanismos*. Universidad Nacional de la Plata.
- VERGARA-BETANCOURT, Angel, SALAZAR-HIDALGO, Eduardo, RAMIRO-JUÁREZ, José De Jesús y RAMIRO-RAMIRO, José. Control de velocidad PI a un motor de DC utilizando herramientas Open Source. *Revista de Tecnología e Innovación* 2017.

Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de control automático* (Séptima ed.). México: Prentice Hall.

Madujano-Venegas, Claudia, Velázquez-Trujillo, Sabino, Escobar-Gómez, Elías Y Rios Rojas, Carlos. Diseño de un sistema de secado con aprovechamiento de calor en la producción de tejas, utilizando lógica difusa apoyada con LabVIEW. *Revista de Sistemas Experimentales* 2016, 3-9: 29-36

Manfred Schleicher, F. B. (2003). *Control Engineering: A guide for Beginners*. Germany: JUMO GmbH & Co.

Melanie, M. (1999). *An Introduction to Genetic Algorithms*.

Nise, N. (2004). *Control Systems Engineering*. USA: John Wiley & Sons.

Ogata, K. (1987). *Dinámica de Sistemas*. México: Prentice Hall.

Ogata, K. (1996). *Sistemas de control en tiempo discreto*. México: Pearson Education.

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna* (5ta. ed.). Madrid, España: Pearson Educación.

Patiño, D. (2016). *Diego Patiño WebSite*. Recuperado el Octubre de 2017, de <https://www.dropbox.com/s/m8m2feohrh016hz/clase2cont.pdf?dl=0>

Sandoval, Sergio, Ruiz, Daniel, Topete, Juan, González, Observador lineal de dos grados de libertad en Matlab-Simulink-CarSim para velocidad lateral del automóvil. *Revista Tecnología e Innovación* 2016. 3-9: 1-10

Vergara Betancourt, A., Salazar Hidalgo, E., Zapata Nava, O. J. (2017). Obtención de la función de transferencia de un motor de DC mediante el análisis de la curva de reacción. *Revista de Aplicación Científica y Técnica*.