

Diseño y construcción de tarjeta electrónica para controlar un motor de CD

A. Arizaga Silva ⁽¹⁾, A. Juárez Bautista ⁽¹⁾

⁽¹⁾Universidad Politécnica de Puebla, Juan C. Bonilla, Puebla, México

e-mail: arizaga@gmail.com armatronic@gmail.com

Resumen: El avance tecnológico de los motores de corriente directa a pequeña escala se ha vuelto cada vez más popular, debido al poco consumo de energía y alta eficiencia para los procesos. Actualmente, existen infinidad de drivers (tarjetas electrónicas) para poder controlar los motores; sin embargo, sus costos son elevados. Por lo tanto, se ha diseñado y construido una tarjeta electrónica a partir de un microcontrolador que permita variar la velocidad de un motor de CD, con técnica PWM. La tarjeta posee una arquitectura abierta para el control de diferentes velocidades y diferentes motores de CD en el intervalo de 12 a 24 V, la interfaz es amigable con el usuario para el uso de diferentes aplicaciones, con una excelente funcionalidad y un costo económico accesible.

Abstract: The technological advance of the direct current motors to small scale has become increasingly popular due to low power consumption and high efficiency for processes. Currently, there are plenty of drivers (electronic cards) to control the motors, but their costs are high. Therefore, we designed and built an electronic card from a microcontroller that can control the speed of a DC motor with PWM technique.

The card has an open architecture for the control of different speeds and different DC motors in the range of 12 to 24 V, the interface is friendly to the user for different applications, with excellent functionality and affordable cost.

Keywords: Tarjeta electrónica, control de motor, microcontrolador.

1. Introducción

Ante el incremento exponencial en las últimas décadas de máquinas y herramientas, que incorporan como parte modular de su funcionamiento un motor de corriente directa (DC), se hace necesario controlarlos de forma precisa, por lo cual, a pesar del amplio tiempo de desarrollo, aún se tiene la necesidad de cubrir esta problemática de una forma más funcional y económica para el usuario. Por lo que controlar un motor de DC es el objeto de estudio y de desarrollo tecnológico para la implementación en dichas máquinas y/o herramientas.

En un inicio, el control de la velocidad de los motores de DC se realizaba mediante un reóstato, resistencia

en serie con el devanado del motor. Este método resulta deficiente debido a que su uso genera pérdidas de energía por calentamiento de la resistencia. Además, de ser de tipo manual por medio de palancas o perillas, siendo éstos, algunos de los problemas en grandes empresas de transformación y manufactura, ya que se tiene que estar monitoreando. Otro de los problemas a resolver es que los motores de DC, tienden a desbocarse al no tener carga en su flecha y de manera recíproca, llegan a disminuir la velocidad o hacerlo más lento al aplicarle carga.

El presente trabajo desarrolla la propuesta de implementar una tarjeta electrónica, capaz de controlar la velocidad de un motor de CD (driver) y desarrollada en el contexto de poder ser utilizada en diversas aplicaciones solicitadas por el usuario, es decir, permitir una arquitectura abierta de funcionamiento. Así mismo, se pretende hacer de este una herramienta didáctica que sirva de apoyo para las diversas aplicaciones de control en algunos mecanismos y robots desarrollados como proyectos de asignaturas en la Universidad Politécnica de Puebla.

2. Planteamiento del problema

Debido al avance tecnológico los motores de DC a pequeña escala se han vuelto cada vez más populares debido al poco consumo de energía y alta eficiencia para los procesos. Actualmente existen infinidad de drivers (tarjetas electrónicas) para poderlos controlar, pero con costos elevados y con funcionalidad específica. Por ello se establece, el diseño y construcción de una tarjeta electrónica para el control de velocidad de un motor de DC bajo una arquitectura abierta, logrando el procesamiento del controlador proporcional, Integrativo, Derivativo (PID) en un microcontrolador bajo la técnica de modulado por ancho de pulso (PWM Pulse Width Modulation) y teniendo un ambiente de programación amigable al usuario para modificar y sintonizar los parámetros del mismo. En consecuencia, se obtiene una tarjeta funcional y de bajo costo, para aplicaciones diversas: investigación, docencia y comercial.

3. Metodología de diseño

Durante el proceso de concepción y desarrollo para la obtención de la tarjeta electrónica controladora de un motor de DC de 12 a 24 V, se establecieron las siguientes etapas:

- Marco teórico, búsqueda de información en torno a las tarjetas electrónicas que controlan motores de corriente directa, de forma técnica y comercial.
- Parámetros de diseño, obtención de los parámetros mínimos requeridos para la identificación en un motor de DC.
- Análisis de motor, obtención del modelo matemático de un motor de DC, mediante una ecuación de Laplace de segundo orden.
- Control de motor, utilización de técnicas de control clásico para la operación de un motor bajo un controlador PID.
- Procesamiento en microcontrolador, implementación de controlador PID, sensado de velocidad y obtención de señal PWM para actuación de motor de DC, además con una ambiente virtual de usuario.
- Desarrollo de tarjeta electrónica, implementación física de todos los elementos necesarios para la manipulación funcional de control de velocidad del motor de DC, es decir, la tarjeta tipo PCB (Printed Circuit Board) y sus elementos electrónicos.
- Pruebas de funcionalidad, análisis de funcionamiento de la tarjeta electrónica con diferentes motores de DC en los que su rango de operación se encuentren de 12 a 24 V.

Dichas etapas conllevan una serie de aspectos atendidos de forma precisa, los cuales explicaremos en la sección de ingeniería de detalle, que sinérgicamente se concluye con su implementación física y funcional.

A continuación, en la Figura 1 se muestra en forma de bloques los dispositivos clave de la tarjeta electrónica para su aplicación al control de un motor de DC.

1. 4. Ingeniería de detalle

Las generalidades de la tarjeta electrónica consideradas para su diseño e implementación se enuncian a continuación:

1. Microcontrolador PIC para generación de modulación de ancho de pulso (técnica PWM), comunicación serial a computadora y programación de controlador PID.
2. Etapa de potencia para integrar señales del microcontrolador con el motor de DC a través de la incorporación del circuito integrado L293B, que permitirá el sentido de giro y valores nominales de PWM.
3. La pertinencia de la arquitectura abierta en la etapa de potencia para la conexión de motores de DC de hasta 20 W y la flexibilidad de incorporar otra tarjeta de potencia entre motor y microcontrolador.
4. Sensado de velocidad angular a través de un encoder óptico rotatorio de tipo incremental.

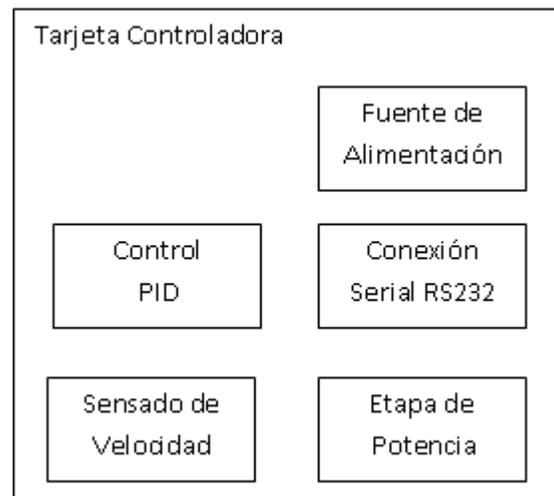


Figura 1. Diagrama a bloques de tarjeta para motor DC.

1.1 4.1. Encoder

A través del encoder se mide la velocidad del motor, considerando lo siguiente:

- I. Contar el número de pulsos del encoder (ρ).
- II. Transformar estos pulsos a desplazamiento angular ($\Delta\theta$), utilizando para ello la siguiente relación:

$$\Delta\theta = \frac{2\pi\rho p}{\text{num.de pulsos del encoder}} \quad (1)$$

- III. Calcular la velocidad angular promedio:

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\text{rad}}{\text{seg}} \quad (2)$$

Donde Δt es el periodo de muestreo de 0.5 segundos.

Las características del encoder son: Marca State Electronic serie 600 de 128 pulsos por revolución, proporcionando una resolución 2.8125 grados/pulso. Por otra parte, la obtención de la velocidad en revoluciones por minuto (RPM) se debe realizar los siguientes pasos:

- I. Contar el número de pulsos del encoder (ρ).
- II. Transformar estos pulsos en revoluciones para lo cual se utiliza la siguiente relación:

$$F = \frac{1}{T} = \frac{\text{No.Ciclos}}{\text{seg}} \quad (3)$$

Donde: un ciclo es igual a una revolución y además T es el tiempo de muestreo. Sustituyendo:

$$\frac{1}{0.5} = 2 \left(\frac{\text{Ciclos}}{\text{seg}} \right) * \left(\frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ minuto}} \right) = 120 \text{rpm} \quad (4)$$

III. Para obtener la velocidad en RPM se debe realizar lo siguiente:

$$\text{Velocidad en RPM} = (\rho)(120rpm) \quad (5)$$

1.2 4.2. Parámetros de motor.

El modelo dinámico de los motores de CD de imán permanente son muy estudiados en la literatura, pero las diversas técnicas de obtención de identificación de sus parámetros se realiza de manera experimental, por ello bajo los requerimientos necesarios en este trabajo se realiza la siguiente técnica.

El modelo dinámico que describe la relación funcional entre la velocidad de cada motor y el voltaje aplicado a la armadura del propio motor se define a partir de las siguientes variables:

R_a = resistencia de la armadura, en ohmios.

L_a = inductancia de la armadura, en henrios.

i = corriente en la armadura, en amperes.

V_a = tensión aplicada a la armadura, en voltios.

V_b = fuerza contra-electromotriz, en voltios

Θ = desplazamiento angular del eje del motor, en radianes.

T = par desarrollado por el motor, en Newton-metro.

J = momento de inercia equivalente del motor y carga con referencia al eje del motor, N-m/rad/seg.

Un motor de imán permanente es aquel en el cuál sus polos están hechos de imanes permanentes, esto es el circuito de campo se remplaza por imanes permanentes.

Por definición, en un motor de imán permanente el flujo magnético es constante, así que su velocidad no puede controlarse mediante la variación de corriente o flujo de campo. Los únicos métodos disponibles para el control de velocidad, son la variación del voltaje de armadura y de la resistencia de armadura [1].

El circuito equivalente de un motor de DC de imán permanente se muestra en la Figura 2, donde la ecuación diferencial del circuito de armadura se obtiene igualando la suma de las caídas de tensión al voltaje aplicado,

$$L_a \frac{di}{dt} + R_a i + V_b = V_a \quad (6)$$

Aplicando la segunda ley de Newton obtenemos la ecuación diferencial que relaciona la aceleración con el par producido por el motor. Por otra parte, el par producido por el motor es proporcional al producto de la corriente de armadura $i(t)$, por una constante de proporcionalidad k_a . Cuando la armadura se encuentra girando se induce en ella una fuerza contra- electromotriz V_b , la cual es directamente proporcional a la velocidad angular $\frac{d\theta}{dt}$, siendo K_b la constante de fuerza contra-electromotriz. Cuando se

hace un estudio simultáneamente las dinámicas eléctricas y mecánicas de un motor de CD, una hipótesis frecuente es considerar que la inductancia de armadura es despreciable. Matemáticamente, lo anterior se justifica si se considera que el motor puede modelarse como un sistema singularmente perturbado [2]. Por tanto la ecuación diferencial que describe el comportamiento de la velocidad angular del motor de DC es:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\left(\frac{K_b K_a}{J R_a} + \frac{b}{J}\right)\omega + \left(\frac{K_a}{J R_a}\right)V_a \quad (7)$$

Donde:

$$\frac{d\omega}{dt} = -C_1 \omega + C_2 V_a \quad (8)$$

Donde C_1 y C_2 son constantes apropiadas. Tomando la transformada de Laplace de ambos miembros de la ecuación (10), encontramos la función de transferencia entre velocidad angular ω y el voltaje V_a ,

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{k}{1+\tau s} \quad (9)$$

$$\text{Donde } k = \frac{C_2}{C_1} \text{ y } \tau = \frac{1}{C_1}$$

Hay que mencionar que la función de transferencia (9), corresponde a un sistema de primer orden, aunque en realidad la función de transferencia de un motor de corriente directa es una función de segundo orden, para fines de identificación aproximada, y bajo la hipótesis de que la inductancia de armadura L es despreciable, es válido aproximar la función de transferencia del motor de CD por la función de transferencia de primer orden dada por (9).

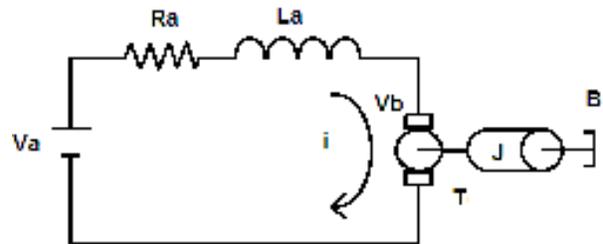


Figura 2. Diagrama eléctrico del motor de DC.

4.3. Identificación de la función de transferencia del motor.

En esta sección se determinan los valores aproximados de los parámetros C_1 y C_2 que aparecen en la ecuación (11). Supongamos que queremos identificar los parámetros K y τ del siguiente sistema de primer orden:

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{k}{1+\tau s} \quad (10)$$

Supongamos que la entrada $u(t)$ es un escalón de magnitud A , es decir $u(t) = A\gamma(t) \geq 0$. En régimen de la frecuencia se

tiene $u(s) = \frac{A}{s}$, Aplicando la transformada inversa de Laplace, la respuesta del sistema en el régimen del tiempo está dada por la ecuación 11 y de forma gráfica la respuesta se denota en la Figura 3.

$$y(t) = kA (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (11)$$

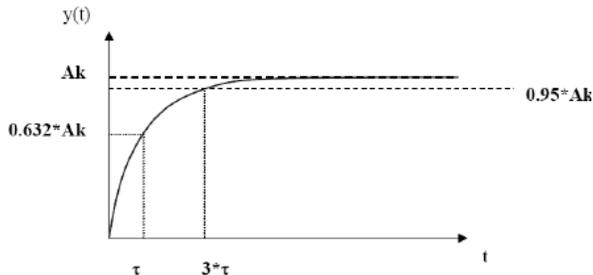


Figura 3. Gráfica de respuesta exponencial.

La ecuación 11 permite identificar de forma experimental las constantes k y τ . Primero se denota:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = y_{est} = kA \quad (12)$$

$$y(\tau) = kA \left(\frac{e-1}{e} \right) \approx 0.632kA \quad (13)$$

$$y(\tau) = 0.632 y_{est} \quad (14)$$

Por lo que de forma práctica se obtienen los parámetros del motor de DC a partir del análisis de la gráfica obtenida al excitar el motor de DC con una entrada escalón, voltaje aplicado al motor, como se muestra en la Figura 4. Se recurrió a un integrado convertidor de frecuencia a voltaje LM331 el cual convierte la frecuencia a una señal de DC, y con esto se pudo obtener los parámetros para el controlador.

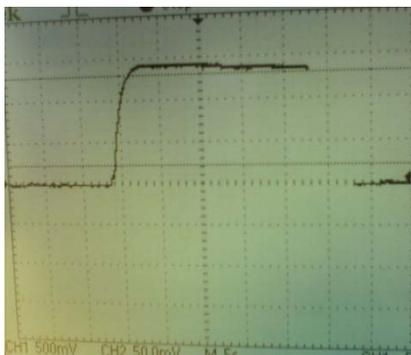


Figura 4. Respuesta del motor de DC.

Ya obtenida la gráfica de respuesta del sistema se procede a obtener los datos necesarios para introducirlos en la función de transferencia discreta.

$$G_d = \frac{0.0697z + 0.0697}{z + 0.9394} \quad (15)$$

4.4. Elaboración del control PID.

Una vez obtenidos los nuevos datos de la función de transferencia en el dominio z el siguiente paso fue sintonizar el Control PID con la ayuda de Matlab. Para sintonizar se utilizó el método de de la curva de reacción de Ziegler-Nichols. Se procedió a realizar una simulación en Simulink, la cual se muestra en la Figura 5 para evaluar si las ganancias obtenidas mediante el método eran las correctas.

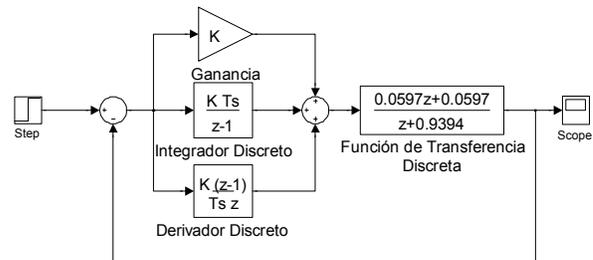


Figura 5. Diagrama a bloques del PID en Simulink.

La Figura 6 permite observar la respuesta del sistema en Simulink, el cual cumple con lo establecido en la sintonización, se debe mencionar que después del método Ziegler-Nichols se llevó a cabo una sintonización fina de los parámetros para llegar al resultado adecuado

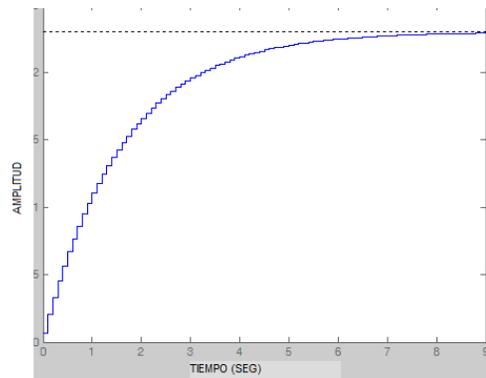


Figura 6. Respuesta del Control PID.

4.5. Programación del control PID en el Microcontrolador.

Para la implementación del control en tiempo real del motor se utilizó la ayuda de la programación de un Microcontrolador a través del programa CCS que permite programar el microcontrolador en un lenguaje de alto nivel como lo es C.

5. Resultados

El control del motor que realiza la tarjeta, como se mencionó anteriormente, se hace a través de una señal PWM, una vez diseñado el control, se verificó la señal de la salida con un Osciloscopio para validar que en efecto el PWM varía con

respecto al cambio en la entrada, esto se observa en la Figura 7.

En la Figura 8 se observa una imagen tridimensional del diseño de la tarjeta del microcontrolador. La misma cuenta con fuente regulada, conexión serial RS232, y los elementos de la señal de salida para controlar el motor.

La sintonización de las variables del Control PID en el microcontrolador se llevan a cabo utilizando algún programa de hyperterminal para puerto serial, la Figura 9 muestra como se realiza el proceso por parte del usuario.

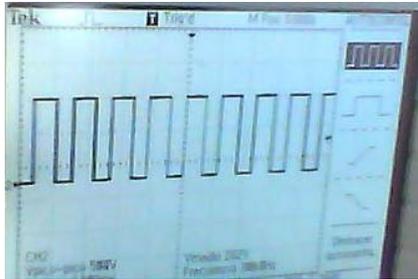


Figura 7. Resultado de la señal entregada por la tarjeta de acuerdo a la sintonización del controlador.

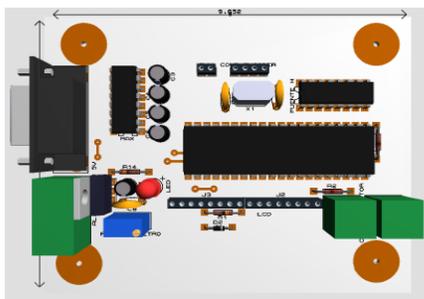


Figura 8. Tarjeta electrónica para controlar la velocidad de un motor de DC.

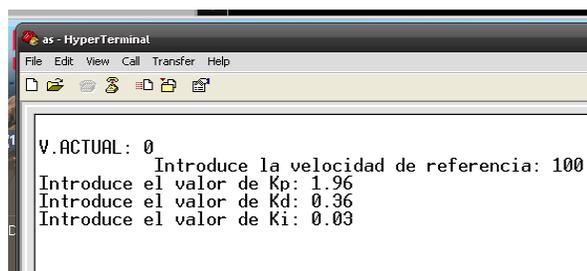


Figura 9. Hyper Terminal para interacción con el usuario: velocidad, ganancias del controlador Kp, Ki y Kd.

6. Conclusiones

Se ha demostrado la implantación de un económico sistema de control de velocidad de tipo didáctico. El controlador PID propuesto permite a los estudiantes observar la señal producida de acuerdo a la sintonización que ellos

propongan a su controlador, lo que complementa las explicaciones teóricas. La etapa de potencia se asemeja a las implementadas en controladores comerciales, lo cual es una aportación adicional del sistema.

El proceso de caracterización del sistema permite comparar el modelo del sistema con los resultados experimentales. La tarjeta electrónica cumple el objetivo de acercar al estudiante a todas las etapas del desarrollo de un sistema de control, definición de un problema, modelado, sintonización, implementación y comprobación mediante la observación de la salida del controlador que genera la tarjeta.

7. Referencias

- [1] Stephen J. Chapman, Máquinas Eléctricas, Mc Graw Hill, 198.
- [2] P. Kokotovic, Khalil H, O'Reilly J. Singular Perturbation in control; analysis and design, Academic Press N.Y. 1986.
- [3] Y. Takahashi, C.S. Chan, D.M Auslander, Parameter Tuning of linear DC algorithms, Contributed by the Automatic control division of the American society of mechanical engineers for presentation at the ASME winter annual meeting, November 29- December 3, 1970, New York.
- [4] Xue D., Zhao C. N., Chen Y. Q. *Fractional order PID control of a DC-motor with elastic shaft: A case study.* Minneapolis, MN, 2006, 3182–3187.
- [5] Angeles Jorge, "Fundamentals of robotic mechanical systems, Theory, Methods and Algorithms", Springer-Verlag NY U.S.A. 1997.

[6] <http://www.astrossp.unam.mx/Instruments/g2m/doc/g2m-motores-1/node64.html>