

Sistema de control difuso para motor de corriente continua sin escobillas (BLDC) sobre hardware embebido

Fuzzy control system for brushless DC motor (BLDC) on embedded hardware

Jhon J. Galvis L.
Universidad de los Andes
jj.galvis916@uniandes.edu.co

José I. Madrid V.
Universidad Tecnológica de Pereira
madrid@utp.edu.co

A diferencia de los motores DC con escobillas, los motores BLDC poseen una dinámica altamente no lineal, lo que dificulta el diseño de esquemas tradicionales de control. Por esta razón, en este artículo se propone el diseño de un esquema de control no lineal de velocidad basado en lógica difusa para la máquina BLDC. El esquema es implementado sobre una plataforma embebida H3 Quad-core Cortex-A7 con una GPU Mali400MP2. El código se desarrolló en Python sobre un OS Linux Debian. Los resultados experimentales muestran que el desempeño del controlador es excelente, eliminando sobrepasos y con una rápida respuesta a cambios de referencia.

Palabras clave: BLDC, control difuso, control de velocidad, no lineal

Unlike DC motors with brushes, BLDC motors have highly non-linear dynamics, making it difficult to design traditional control schemes. For this reason, this paper proposes the design of a nonlinear speed control scheme based on fuzzy logic for the BLDC machine. The scheme is implemented on an embedded H3 Quad-core Cortex-A7 platform with a Mali400MP2 GPU. The code was developed in Python on a Debian Linux OS. The experimental results show that the performance of the controller is excellent, eliminating overshoots and with a quick response to changes of reference.

Keywords: BLDC, fuzzy control, non-linear, speed control

Tipología del artículo: Investigación

Fecha recepción del manuscrito: Noviembre 4, 2016

Fecha aceptación del manuscrito: Diciembre 5, 2016

Investigación financiada por: Universidad Tecnológica de Pereira.

Edición digital: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/issue/view/798>

Cómo citar: Galvis, J. y Madrid, J. (2016). *Sistema de control difuso para motor de corriente continua sin escobillas (BLDC) sobre hardware embebido*. Revista Tekhnê, 13(2), 43-48.

Introducción

Los motores de corriente continua sin escobillas (BLDC) son motores eléctricos cuyo funcionamiento se basa en imanes permanentes. El devanado de los motores BLDC se encuentra en el estator, y el imán permanente está en el rotor. El motor conmuta por medio de la posición de rotor detectada por un sensor (sensor Hall). Estas máquinas son la opción perfecta en aplicaciones que requieren alta confiabilidad, alta eficiencia y una buena relación potencia-tamaño, dada su capacidad de suministrar un muy buen torque sobre un amplio rango de velocidades. Con respecto a los motores DC tradicionales con escobillas, poseen curvas de desempeño en velocidad y torque muy similares. Sin embargo, a diferencia de ellos, no poseen contactos mecánicos o escobillas. Esta característica les brinda un menor costo y mayor vida útil con menor mantenimiento, pero exige el uso de un control electrónico, y hace que su modelo de comportamiento sea altamente no lineal (Sang-Hoon, 2017).

Actualmente existe una gran cantidad de investigación alrededor del control de motores, y en particular de los motores BLDC. Las técnicas de control se han beneficiado de los esquemas de control desarrollados para convertidores DC-DC de potencia (Martínez S., 2011). Debido a que los circuitos *drives* requieren alta capacidad de desempeño, en particular en cuanto a precisión y velocidad (Igleheart et al., 2013), entre estos esquemas de control sobresalen herramientas con capacidad sobresaliente para plantas no lineales, como es el caso de la lógica difusa.

Un sistema de control difuso se soporta en reglas de la forma *SI - ENTONCES* para establecer relaciones entre entradas y salidas del sistema de control. Bajo este esquema no es necesario sintonizar parámetros de un sistema de control no lineal, así como tampoco se requiere de un modelo de la planta. Además, las reglas pueden ser definidas de cualquier forma, e incluso para condiciones específicas de operación del sistema.

Esta estrategia de control se ha utilizado ampliamente para el manejo de motores eléctricos. En el caso de máquinas AC, para el caso de los motores de inducción (el motor más usado en la industria) se ha utilizado para mejorar la respuesta dinámica de las máquinas frente a pequeños cambios en la carga o en la velocidad de referencia (Kumar y Febin, 2013; Vahedpour, Ranjbar, y Agheh, 2015; YiMing, Yuebin, Quanfeng, y Wei, 2013).

En cuanto a máquinas DC, el control difuso ha sido importante en esquemas con altas exigencias en el sobrepaso, tiempo de subida, tiempo de establecimiento y error de estado estacionario (Gupta y Varshney, 2013; Valdez, Melin, y Castillo, 2012). Variantes de las máquinas DC, por ejemplo, los motores paso a paso, han utilizado también control difuso para permitir adaptar el comportamiento del sistema de control a variaciones

de operación del sistema y circunstancias de la planta (Ahmadi et al., 2012; Kantawong, 2015).

En el caso de los motores BLCD, es normal la implementación de esquemas híbridos difusos-PID (Faraji y Akbari, 2016; Jianli, Yanchun, y Yinghui, 2016). Esta mezcla busca, igual que antes, mejorar el desempeño del sistema de control en las diferentes zonas de operación del motor. Es de anotar además, que la mayoría de las estrategias documentadas se limitan a simular el comportamiento del esquema (Shyam y Daya, 2013), solo en algunos casos se documenta implementaciones, y muy pocos casos sobre sistemas embebidos (Chao, Yuan, y Hai, 2016; Shanmugasundram, Muhammad, y Yadaiah, 2014; Xiao, 2013).

Un elemento adicional a considerar durante el diseño del control difuso para la máquina BLDC, es que el esquema clásico de control difuso no contempla una estructura integral, su comportamiento es más similar a un bloque de control PD (Proporcional Derivativo) (Jianli et al., 2016). Esto hace que la respuesta dinámica de un bloque de control difuso sea muy buena, incluso trabajando con plantas altamente no lineales, pero hace también que su respuesta estática no sea la mejor. Bajo estas condiciones, un control difuso tradicional no puede producir una respuesta global de alto desempeño, lo cual es lo esperado con el esquema de control embebido propuesto.

Para resolver este problema, se propone un esquema de control difuso híbrido que contemple un componente integral en el bloque de control. De hecho, los sistemas de control difuso son ideales para mezclar esquemas de control híbridos definidos en diferentes zonas de comportamiento, haciendo fácil su integración en un único bloque (Martínez S., Acero S., y Castiblanco, 2010). En este caso, se propone mezclar el esquema de control difuso con un bloque PID (Proporcional, Integral Derivativo) definido cada uno en diferentes zonas de operación, que permita garantizar el desempeño del sistema de control de velocidad sin importar el punto de operación del motor. El particular, el bloque de control difuso se utiliza cuando el error de velocidad es grande, y el bloque de control PID se utiliza cuando el error de velocidad es pequeño (Jianli et al., 2016; Martínez S. et al., 2010).

El artículo se encuentra organizado de la siguiente forma. En la Sección 2 se presentan algunos conceptos preliminares, el perfil funcional del prototipo, y algunas otras consideraciones de diseño. En la Sección 3 se detalla completamente el diseño de la estructura del prototipo, incluyendo los criterios de selección y las especificaciones finales adoptadas. En la Sección 4 se presenta la evaluación del desempeño observado en laboratorio del prototipo. Finalmente, la Sección 5 concluye el artículo.

Formulación del problema

En el motor BLDC el flujo se produce por la corriente a través del imán permanente, y su naturaleza es no lineal. Por lo tanto, el sistema de control de velocidad del motor BLDC debe ser capaz de adaptarse al comportamiento no lineal de la máquina, y producir una buena respuesta dinámica. Además, la energización de las bobinas se sincroniza a partir de la señal de un sensor de efecto Hall que permite estimar la velocidad. En este motor la fuerza contra-electromotriz tiene forma trapezoidal.

El control de velocidad de la máquina corresponde a un control vectorial. Se debe utilizar los valores de voltaje y corriente de la máquina para ajustar la velocidad del rotor. La señal de control se aplica a través de un inversor trifásico sobre las bobinas del estator. La respuesta del motor BLDC esta altamente influenciada por variaciones en la carga y en los parámetros del sistema. Los esquemas de control tradicionales se diseñan sobre modelos linealizados del motor, por lo cual solo son adecuados para sistemas simples sin altos requerimientos en operación estática.

Las ecuaciones de voltaje del motor BLDC son las siguientes (ecu. 1) (Shyam y Daya, 2013):

$$\begin{aligned} V_1 &= i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{1,2} \frac{di_2}{dt} + M_{1,3} \frac{di_3}{dt} + e_1 \\ V_2 &= i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{2,1} \frac{di_1}{dt} + M_{2,3} \frac{di_3}{dt} + e_2 \\ V_3 &= i_3 R_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + M_{3,1} \frac{di_1}{dt} + M_{3,2} \frac{di_2}{dt} + e_3 \end{aligned} \quad (1)$$

Donde e_1 , e_2 y e_3 son las fuerzas contra-electromotriz que son función del ángulo del rotor, el cual esta dado por (ecu. 2):

$$e = K_e \times \omega_m \quad (2)$$

K_e es la constante de fuerza contra-electromotriz. Este modelo matemático se puede representar de la siguiente forma (ecu. 3):

$$\begin{bmatrix} L_1 & M_{1,2} & M_{1,3} \\ M_{2,1} & L_2 & M_{2,3} \\ M_{3,1} & M_{3,2} & L_3 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Ahora, las inductancias son independientes de la posición del rotor, por lo tanto (ecu. 4):

$$\begin{aligned} L_1 &= L_2 = L_3 = L \\ M_{1,2} &= M_{2,1} = M_{1,3} = M_{3,1} = M_{2,3} = M_{3,2} = M \end{aligned} \quad (4)$$

Y, si el sistema es balanceado (ecu. 5):

$$R_1 = R_2 = R_3 = R \quad (5)$$

Re-escribiendo la ecu. 3 se obtiene (ecu. 6):

$$\begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

El torque electromagnético esta dado por (ecu. 7):

$$T_{em} = J \frac{d\omega_r}{dt} + \beta \omega_r + T_l \quad (7)$$

Este torque electromagnético depende de la fuerza contra-electromotriz, donde la relación con la corriente se puede escribir como (ecu. 8):

$$T_{em} = \frac{1}{\omega_m} [e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3] \quad (8)$$

La función de transferencia del motor BLDC se escribe como (ecu. 9):

$$G(s) = \frac{\frac{1}{K_e}}{T_m T_e s^2 + T_m s + 1} \quad (9)$$

Donde T_m es la constante mecánica de tiempo y T_e es la constante eléctrica de tiempo.

Metodología

La Fig. 1 muestra un diagrama esquemático del sistema de control propuesto. La velocidad del motor es sensada continuamente por medio de sensores Hall. La unidad de control calcula el error de velocidad, y de acuerdo a su valor, y los vectores de corriente y fuerza contra-electromotriz, estima la secuencia de conmutación para el inversor (los seis pulsos de disparo de los IGBTs) de acuerdo a las reglas difusas (mezcla las superficies de control difuso para grandes valores de error, con las del control PID para pequeños valores de error). En la secuencia de conmutación trifásica, solo dos fases del motor BLDC conducen en un determinado instante.

El sistema de control híbrido difuso-PID contempla dos variables de entrada: el error de velocidad e y el cambio en este error de , y una variable de salida V_{ref} que es un voltaje de referencia del lazo de voltaje, que se utiliza para calcular la secuencia de pulsos de disparo del inversor. Se define un total de cinco conjuntos difusos para cada una de las variables difusas así: Negativo Grande (NG), Negativo Pequeño (NP), Cero (Z), Positivo Pequeño (PP) y Positivo Grande (PG). Las variables de entrada y salida son escaladas y normalizadas dentro de su propio universo de discurso. Las funciones de pertenencia utilizadas en el control para las variables de entrada y salida se muestran en la Fig. 2.

El esquema de control híbrido difuso-PID utiliza la inferencia difusa de Sugeno (Takagi-Sugeno-Kang) en la máquina de inferencia. Se utiliza Sugeno en lugar de la clásica inferencia de Mamdani debido a la estructura híbrida

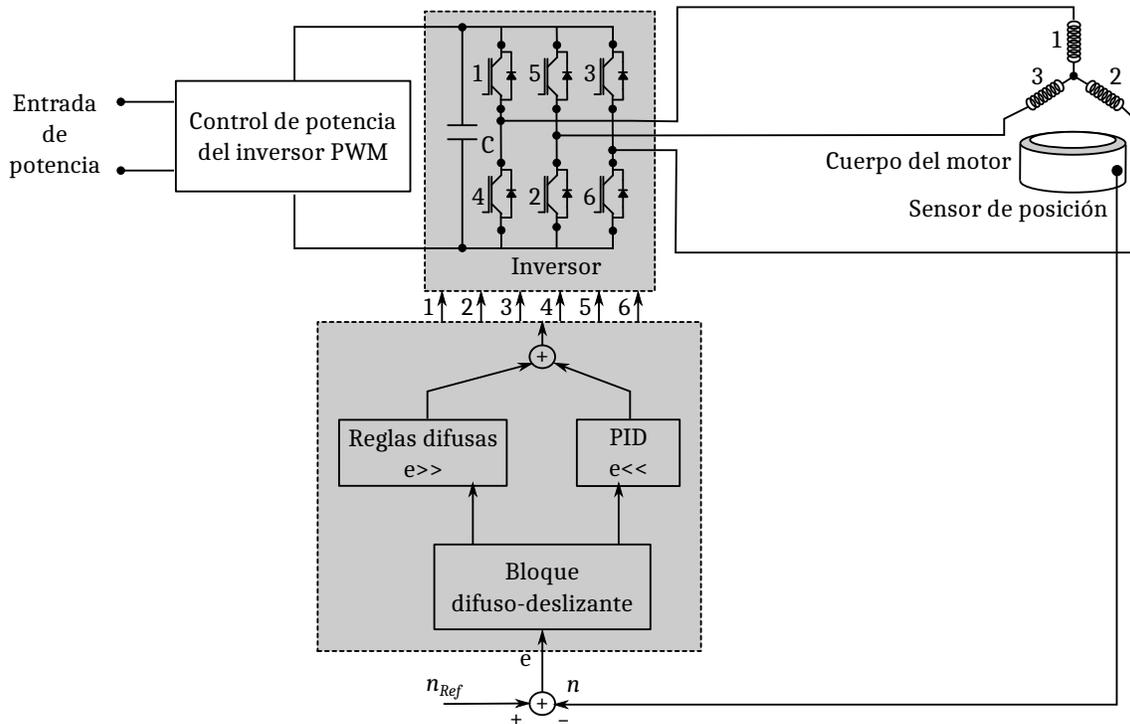


Figura 1. Diagrama del esquema de control difuso propuesto.

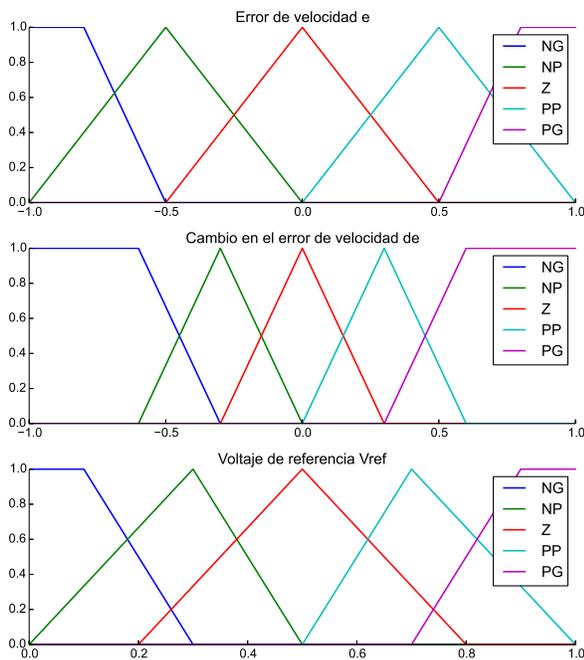


Figura 2. Funciones de pertenencia para las variables de entrada y salida.

del control. En Sugeno las funciones de pertenencia de salida pueden ser tanto constantes como funciones lineales,

permitiendo combinar las dos superficies de control dentro de un único conjunto de reglas difusas. Las reglas de control reducen la energía del sistema de acuerdo al comportamiento clásico del control difuso cuando el error de velocidad es grande, y aplican el control lineal PID cuando el error de velocidad es pequeño. La tabla 1 muestra las reglas de control definidas para el esquema propuesto.

Tabla 1
Base de reglas difusas.

<i>e/de</i>	NG	NP	Z	PP	PG
NG	NG	NP	PID	NP	Z
NP	NG	NP	PID	Z	PP
Z	NP	NP	PID	PP	PP
PP	NP	Z	PID	PP	PG
PG	Z	PP	PID	PP	PG

Los valores de K_p (constante proporcional), K_i (constante integral) y K_d (constante diferencial) del bloque PID (se utilizó una estructura paralela) se determinaron mediante la regla de Ziegler-Nichols, y haciendo uso de la función de transferencia del motor BLDC.

La unidad de control se estructuró sobre una plataforma embebida soportada por el procesador H3 Quad-core Cortex-A7 con una GPU Mali400MP2. Sobre dicha plataforma se instaló un OS Linux Debian. El esquema de

control fue simulado en Python con ayuda de SciKit-Fuzzy y Numpy. El resultado de esta simulación (voltaje de referencia) fue almacenado como una tabla direccionada por los valores digitalizados de error de velocidad y variación del error.

El código de control se desarrolló en Python. Este código se encarga de leer la velocidad, calcular el error de velocidad, calcular la variación de error de acuerdo a la historia de la variable, aplicar el esquema de control, y generar las señales de disparo para el inversor. También visualiza en pantalla (conexión directa por HDMI) el comportamiento de las variables.

Resultados

Para verificar el desempeño del esquema de control difuso-PID se construyó en laboratorio un prototipo de control y un circuito *drive*. Para la unidad de control se utiliza un hardware embebido de arquitectura ARM de 32 bits con OS gráfico y acceso en tiempo real a los puertos. El código de control esta escrito en Python, y tiene comunicación directa con el circuito *drive*. El circuito *drive* alimenta a un inversor trifásico en puente completo, que recibe potencia desde un bus DC de 42 V.

La velocidad del motor controlado es medida por medio de un encoder acoplado al eje del motor. Esta señal es alimentada también a la unidad de control para evaluación de desempeño y visualización.

El desempeño se evaluó por medio del ajuste programado de la señal de referencia de velocidad. Luego de estar en estado estacionario a una velocidad de 1500 rpm, se aplica un paso a la referencia para modificar dicho valor a 2000 rpm. Esta señal de referencia se mantiene por 30 segundos, tiempo luego del cual se ajusta nuevamente a 1500 rpm (Fig. 3). Este comportamiento permite evaluar el desempeño tanto estático como dinámico del esquema de control, dado que se observa tanto el comportamiento transitorio como el error en estado estacionario.

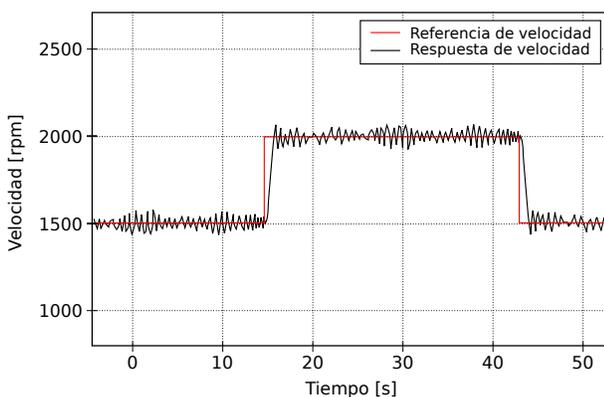


Figura 3. Respuesta del motor frente a cambios escalones en la referencia de velocidad.

La Fig. 3 muestra el comportamiento registrado por el sistema frente a esta señal de prueba. Filtrando el ruido de estado estacionario, el sistema no presenta error de estado estacionario. La velocidad del motor sigue a la referencia con un retardo inferior a los dos segundos sin sobre-pasos. El retardo de la respuesta fue inferior siempre a los 500 ms.

Conclusiones

Este artículo propone un esquema de control híbrido difuso-PID para el control de un motor BLDC. Se describen los detalles del esquema así como su implementación en un prototipo de laboratorio y su desempeño real en respuestas estáticas y dinámicas. El esquema de control propuesto se implementa sobre una plataforma embebida ARM de 32 bits, con ejecución en tiempo real del algoritmo. La velocidad de respuesta se logra simulando *off line* todos los posibles comportamientos de las variables de estado, y almacenando los resultados del control en una tabla cuya dirección de búsqueda se construye a partir de las señales de entrada del sistema. Los resultados sobre el prototipo muestran un excelente comportamiento del esquema de control frente a cambios rápidos en la referencia de velocidad.

Referencias

- Ahmadi, A., Tousizadeh, M., Mehdi, a., Fadzli, M., Buyamin, S., y Abd, H. (2012). Designing an optimal fuzzy-pid controller for speed tracking of stepper motor. En *Ieee symposium on industrial electronics and applications (isiea 2012)* (p. 193-198).
- Chao, C., Yuan, W., y Hai, L. (2016). Siso pid-fuzzy controller for bldc motor speed control base on low cost msp430 solution. En *5th international symposium on next-generation electronics (isne 2016)* (p. 1-2).
- Faraji, I., y Akbari, M. (2016). Adaptive speed control of brushless dc (bldc) motor based on interval type-2 fuzzy logic. En *24th iranian conference on electrical engineering (icee 2016)* (p. 1119-1124).
- Gupta, S., y Varshney, P. (2013). Fractional fuzzy pid controller for speed control of dc motor. En *Third international conference on advances in computing and communications (icacc 2013)* (p. 1-4).
- Igleheart, C., Marques, J., Ramirez-Leon, C., Li, Y., Ashrafzadeh, F., y Wilson, S. (2013). A robust pid-type fuzzy logic controller for variable speed motor drives. En *North american power symposium (naps 2013)* (p. 1-6).
- Jianli, J., Yanchun, W., y Yinghui, H. (2016). The fuzzy-pid control of brushless dc motor. En *Ieee international conference on mechatronics and automation (icma 2016)* (p. 1440-1444).
- Kantawong, S. (2015). Smart men tailoring dummy robot using dc stepper motor with rfid and fuzzy-pid control system. En *2nd international conference*

on advanced informatics: Concepts, theory and applications (icaicta 2015) (p. 1-6).

- Kumar, R., y Febin, J. (2013). A novel self - tuning fuzzy based pid controller for speed control of induction motor drive. En *International conference on control communication and computing (iccc 2013)* (p. 62-67).
- Martinez S., F. H. (2011). *Algunas aplicaciones de la lógica difusa en el control de convertidores dc/dc*. Distrital University Francisco José de Caldas. (ISBN 978-958-8723-08-2)
- Martinez S., F. H., Acero S., D. M., y Castiblanco, M. (2010, August). Hybrid fuzzy-sliding scheme for the balance control of a biped robot. En D.-S. Huang, X. Zhang, C. Reyes García, y L. Zhang (Eds.), *Lecture notes in artificial intelligence 6216. advanced intelligent computing theories and applications with aspects of artificial intelligence* (Vol. 6216, p. 434-441). Springer Berlin Heidelberg. Descargado de http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-14932-0_54
- Sang-Hoon, K. (2017). *Electric motor control: Dc, ac, and bldc motors* (1.^a ed.). Elsevier Science.
- Shanmugasundram, R., Muhammad, K., y Yadaiah, N. (2014). Implementation and performance analysis of digital controllers for brushless dc motor drives. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19(1), 213-224.
- Shyam, A., y Daya, F. (2013). A comparative study on the speed response of bldc motor using conventional pi controller, anti-windup pi controller and fuzzy controller. En *International conference on control communication and computing (iccc 2013)* (p. 68-73).
- Vahedpour, M., Ranjbar, A., y Agheh, H. (2015). Comparison between performance of conventional, fuzzy and fractional order pid controllers in practical speed control of induction motor. En *2nd international conference on knowledge-based engineering and innovation (kbei 2015)* (p. 912-916).
- Valdez, F., Melin, P., y Castillo, O. (2012). Particle swarm optimization for designing an optimal fuzzy logic controller of a dc motor. En *Annual meeting of the north american fuzzy information processing society (nafips 2012)* (p. 1-6).
- Xiao, H. (2013). Research of the fuzzy control system for brushless dc motor based on tms320f2407. En *5th international conference on intelligent human-machine systems and cybernetics (ihmsc 2013)* (p. 385-387).
- YiMing, L., Yuebin, W., Quanfeng, Y., y Wei, H. (2013). The technology study of fuzzy control system for asynchronous motor. En *3rd international conference on consumer electronics, communications and networks (cecnet 2013)* (p. 710-713).

