

Control de velocidad de motores sin escobillas mediante instrumentación virtual

PATRICK CÉSAR MARTÍNEZ MARROQUÍN¹, JACOB JAVIER VÁSQUEZ SANJUAN², AND MARCO ANTONIO ALONSO PÉREZ²

¹Maestría en Ingeniería en Automatización de Procesos Industriales, Universidad Politécnica de Puebla, 3er. Carril del ejido serrano s/n, San Mateo Cuanalá, Puebla, México. C.P. 72640, patrick.martinez4404@uppuebla.edu.mx

²Ingeniería en Sistemas Automotrices, Universidad Politécnica de Puebla, 3er. Carril del ejido serrano s/n, San Mateo Cuanalá, Puebla, México. C.P. 72640, jacob.vasquez@uppuebla.edu.mx, marco.alonso@uppuebla.edu.mx

Compiled 5 de diciembre de 2018

En este artículo se propone el diseño e implementación de un controlador PID, cuyo propósito es controlar la velocidad angular de dos motores eléctricos sin escobillas tipo SG/F10. El diseño es desarrollado usando el software LabVIEW e implementado mediante el dispositivo embebido NI myRIO-1900. © 2018 Universidad Politécnica de Puebla

Palabras clave: Motor brushless, PID, myRIO-1900, LabVIEW.

<http://dx.doi.org/10.1364/ao.XX.XXXXXX>

1. INTRODUCCIÓN

A finales de la década de 1990, las técnicas informáticas y las teorías de control se desarrollaron rápidamente, fue eso lo que promovió la evolución del motor *brushless* (MB) [1]. En años recientes el desarrollo del vehículo eléctrico se ha incrementado, así también, el desarrollo de motores eléctricos capaces de satisfacer los requerimientos de tracción dentro de los cuales destacan el motor de inducción y el MB como los más utilizados para proporcionar tracción a un vehículo, por lo que en el cuadro 1 se presentan las diferencias entre el MB y el motor de inducción.

Cuadro 1. Diferencias entre el motor brushless y el motor de inducción [2].

Rubro	Motor brushless	Motor de inducción (jaula de ardilla)
Características velocidad/par	Operación en todo el rango de velocidad a par nominal.	No lineal, par bajo a velocidades bajas.
Inercia del rotor	Baja. Mejores características dinámicas.	Alta. Características dinámicas pobres.
Requerimientos de control	Siempre se requiere un controlador para mantener la operación del motor	A velocidad constante no se requiere controlador, a velocidad variable sí se requiere.
Deslizamiento	No existe deslizamiento entre rotor y estator.	La frecuencia del rotor es menor a la del estator, el deslizamiento aumenta con la carga.

En comparación con los motores DC con escobillas y motores de inducción, los MB tienen muchas ventajas y pocas desventajas, destacando las siguientes:

- Los motores sin escobillas requieren menos mantenimiento, por lo que tienen una vida más larga en comparación con los motores de DC.
- Los MB producen más potencia de salida por tamaño de cuadro que los motores DC y los motores de inducción, debido a que el rotor está hecho de imanes permanentes, la inercia provoca que el rotor sea menor, en comparación con otros tipos de motores.

Los motores sin escobillas, son ideales para áreas de acceso limitado y aplicaciones donde el servicio es difícil. Los MB funcionan más silenciosamente que los motores de DC con escobillas, lo que reduce la interferencia electromagnética (EMI) [2].

A. MB de corriente alterna

El MB trifásico de imanes permanentes de corriente alterna (CA), recibe el nombre de motor síncrono ya que la velocidad angular del rotor se relaciona con la velocidad angular del campo magnético giratorio en el estator y no existe deslizamiento entre estas dos velocidades [3].

En la figura 1 se muestra el MB con sus partes, el cual está formado por 4 elementos básicos:

1. Rotor
2. Estator
3. Sensor Hall
4. Imanes permanentes

En el MB, el rotor está hecho de un imán permanente que es impulsado por la fuerza magnética del circuito de bobinado del estator. Utiliza un sensor y un circuito electrónico para la conmutación de corriente. La corriente y el voltaje son respectivamente proporcionales al par y la velocidad de rotación [4].



Fig. 1. Partes de motor brushless [4].

B. Sistemas de control

El control automático es de vital importancia en el mundo de la ingeniería. Además de resultar imprescindible en sistemas robóticos; procesos de manufactura; operaciones industriales como el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad, y flujo en las industrias de transformación [5]. Más de la mitad de los controladores industriales que se usan hoy en día utilizan esquemas de control PID o PID modificado.

La utilidad de los controles PID estriba en que se aplican en forma casi general a la mayoría de los sistemas de control [6]. En el año de 1983, Truchard y Kodosky, de National Instruments, decidieron enfrentar el problema de crear un software que permitiera utilizar la computadora personal (PC) como un instrumento para realizar mediciones. Después de tres años crearon la primera versión del software que permitió, de una manera gráfica y sencilla, diseñar un instrumento en la PC. De esta manera surge el concepto de instrumento virtual (VI), el cuál se ejecuta en una computadora y tiene sus funciones definidas por software [7]. A este software le dieron el nombre de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, más comúnmente conocido por las siglas LabVIEW.

2. INSTRUMENTACIÓN

El sistema de control de velocidad que se presenta está diseñado para dos motores *brushless* que deberán trabajar de manera simultánea y con la misma velocidad y par de carga.

Los elementos necesarios para este sistema son:

- Dos motores brushless
- Controlador de velocidad
- Dispositivo embebido myRIO-1900
- PC con software LabVIEW

A. Motor brushless (MB)

Son motores sin escobillas que realizan la misma función de un motor DC normal, que funcionan con una lógica para la conmutación de los embobinados [8, 9].

En la figura 2 se muestra el MB empleado en este proyecto.

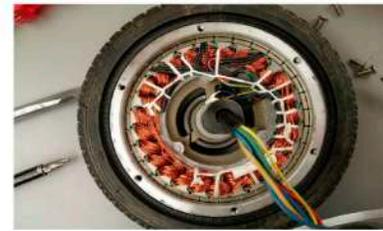


Fig. 2. Motor brushless.

B. Controlador de velocidad brushless DC 48V

Es el encargado de suministrar la señal trifásica necesaria para que los MB puedan girar. La función de este dispositivo es mantener las revoluciones por minuto (RPM) de manera constante ante condiciones de carga mostradas en la figura 3.

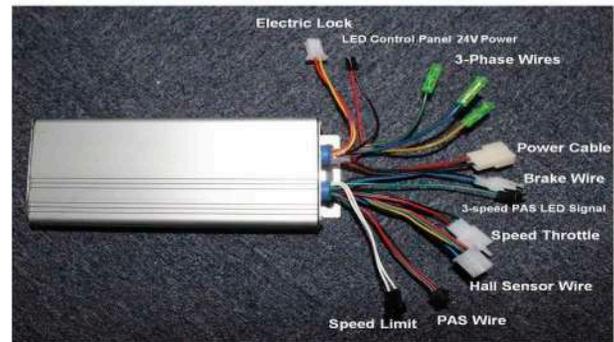


Fig. 3. Controlador de velocidad del motor brushless.

Tiene 4 grupos de cables necesarios (cables de alimentación, cables de bloqueo electrónico, cables de acelerador y cables de fase motor).

C. Dispositivo embebido NI myRIO-1900

El dispositivo embebido es una parte esencial para el control de velocidad de MB mostrado en la figura 4, puesto que con éste se adquieren los datos de los sensores del encoder presente en los motores. Las señales que el dispositivo adquiere se utilizan para el algoritmo de control que es el encargado de mantener la velocidad angular deseada y la estabilidad de los motores ante cualquier perturbación. El sistema myRIO-1900 de *National Instruments* cuenta con un FPGA interno Xilinx y un procesador ARM CortexA9 dual core, compatible con programación en LabView o C [10].



Fig. 4. Dispositivo embebido NI myRIO-1900.

3. ESTRATEGIA DE CONTROL

A. Controlador PID

El controlador PID se puede describir mediante la ecuación (1)

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int^t e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

donde, el error e es la diferencia entre la señal de referencia (valor deseado) y la salida del proceso y (la variable medida). K es la ganancia proporcional del controlador, T_i , el tiempo de integración o el tiempo de reinicio, y T_d el tiempo derivado [11]. En la figura 5 se visualiza el diagrama a bloques de un controlador PID. En este proyecto su diseño se realiza en LabVIEW y se implementa en el dispositivo myRIO-1900.

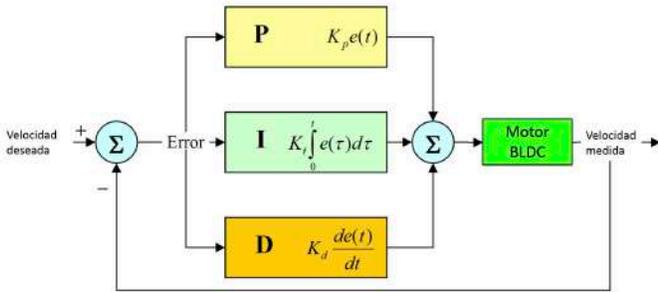


Fig. 5. Diagrama a bloques del controlador PID.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

Para la implementación del control PID que modifica la velocidad angular de las ruedas, fue necesario realizar la caracterización del comportamiento de velocidad de los MB con respecto al voltaje.

Los MB empleados en el proyecto vienen acoplados a unas ruedas de 16 pulgadas de diámetro tal y como se muestra en la figura 6.



Fig. 6. Motor con ruedas.

Para poder realizar el control y las pruebas de velocidad mediante el dispositivo embebido fue necesario montar los motores con rueda a un soporte fijo diseñado previamente el cuál se muestra en la figura 7.



Fig. 7. Motores *brushless* montados en soporte fijo.

En la figura 8 se visualiza la forma en que se obtuvieron los valores de voltaje de entrada por la terminal *Speed Throttle* del controlador y la velocidad angular de las ruedas. A partir del uso de un multímetro digital y un tacómetro DT-2230.



Fig. 8. Obtención de los valores de voltaje y RPM.

Los valores obtenidos de voltaje y RPM se muestran en las gráficas de las figuras 9 y 10, a partir de estas se pudieron obtener las funciones que caracterizan a cada motor en función del voltaje de entrada y RPM.

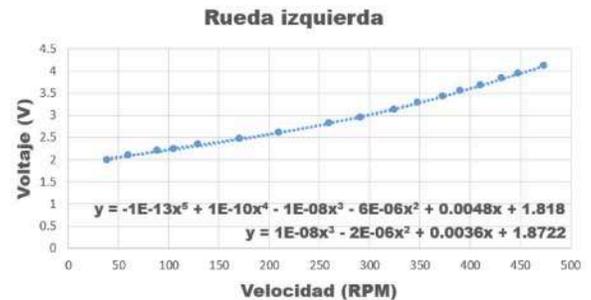


Fig. 9. Funciones del comportamiento de la velocidad (RPM) respecto al voltaje (V) de la rueda izquierda.

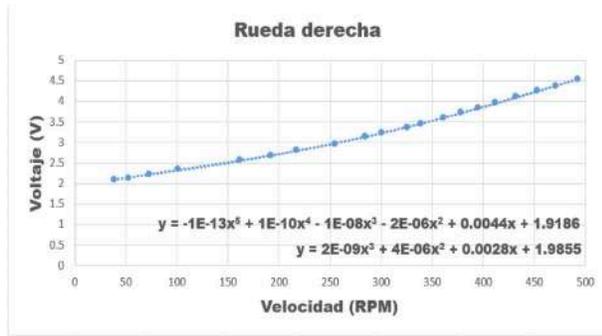


Fig. 10. Funciones del comportamiento de la velocidad (RPM) respecto al voltaje (V) de la rueda derecha.

A. Análisis de funciones obtenidas

Las funciones obtenidas para la rueda izquierda están descritas en las ecuaciones (2) y (3), cabe resaltar que estas ecuaciones son de 3^o y 5^o orden. Puesto que la ecuación de orden 5 describe el comportamiento de las RPM respecto al voltaje hasta una velocidad de 375 RPM, a partir de esta velocidad es la ecuación de orden 3 la que describe mejor el comportamiento de esta rueda, se emplean ambas ecuaciones. La rueda derecha se describe mediante las ecuaciones (4) y (5); la ecuación (4) describe el comportamiento de manera correcta hasta 170 RPM, a partir de esta velocidad es la ecuación (5) la cuál se ajusta mejor al comportamiento de la rueda derecha.

Ecuaciones para rueda izquierda:

$$y = -1x10^{-13}(x^5) + 1x10^{-10}(x^4) - 1x10^{-8}(x^3) - 6x10^{-6}(x^2) + 0,0048x + 1,818 \quad (2)$$

$$y = 1x10^{-8}(x^3) - 2x10^{-6}(x^2) + 0,0036x + 1,8722 \quad (3)$$

Ecuaciones para rueda derecha:

$$y = -1x10^{-13}(x^5) + 1x10^{-10}(x^4) - 1x10^{-8}(x^3) - 2x10^{-6}(x^2) + 0,0044x + 1,9186 \quad (4)$$

$$y = 2x10^{-9}(x^3) + 4x10^{-6}(x^2) + 0,0028x + 1,9855 \quad (5)$$

B. Control de velocidad en LabVIEW

Con la obtención de las ecuaciones que describen el comportamiento de las ruedas derecha e izquierda, se realizó mediante el software LabVIEW el panel frontal del programa mostrado en la figura 11, el cuál cuenta con seleccionador de velocidad deseada, un indicador de voltaje, dado por el dispositivo myRIO, dos indicadores: un velocímetro y un indicador de velocidad, ambos realizan la lectura de la velocidad en tiempo real de cada rueda. En la parte inferior de cada gráfica que muestra la respuesta en tiempo real de cada rueda y la referencia, se visualizan las constantes del controlador PID (Kp, Ki y Kd).

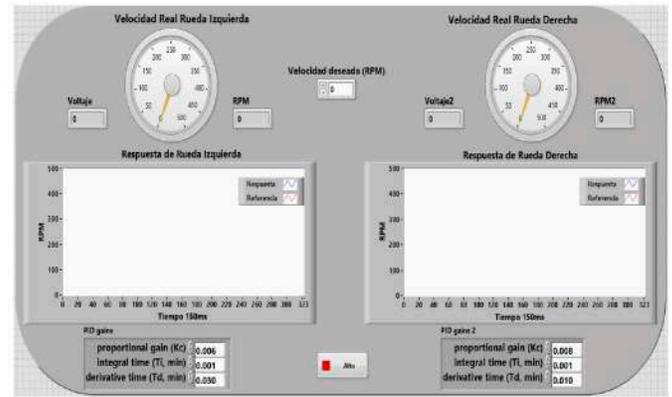


Fig. 11. Panel frontal.

LabVIEW posee un bloque de controlador PID como se muestra en la figura 12 con el cuál solo es necesario realizar las conexiones de cada terminal. Existen en la literatura varios métodos para determinar los valores de las constantes del controlador si se tiene el modelo matemático de la planta, en este caso no se cuenta con el modelo y es por ello que de manera heurística se determinan los valores de las constantes, variando estas constantes y obteniendo la respuesta de cada MB se determinaron dichos valores; para la rueda izquierda son: Kp= 0.006, Ki= 0.001, Kd= 0.030 y para la rueda derecha son: Kp= 0.008, Ki= 0.001, Kd= 0.010 con un tiempo de muestreo de 200 ms.

PID (DBL)

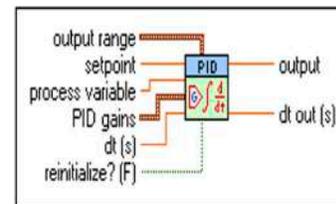


Fig. 12. Bloque PID de LabVIEW.

Para el cálculo de las RPM en tiempo real en el software LabVIEW de cada MB se utilizó el código mostrado en la figura 13, el cual adquiere el número de pulsos proporcionado por un encoder incorporado en el motor. Este valor es atribuido a la variable "new", la variable "change", es la diferencia entre el valor del ciclo pasado y el valor del ciclo actual; las RPM son obtenidas al dividir la variable "change" entre 23 que es el valor de pulsos por revolución que entrega cada MB, es multiplicado por 5 debido a que cada ciclo es de 200ms y por 60 para convertir revoluciones por segundo a revoluciones por minuto. La variable "last" es actualizada cada ciclo por el valor dado en ese ciclo para poder realizar las operaciones.

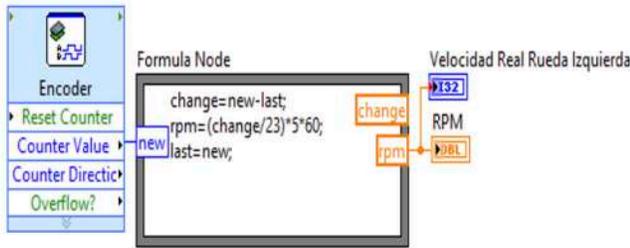


Fig. 13. Código para RPM en LabVIEW.

En la figura 14 se muestra el diagrama a bloques del control de velocidad del MB.

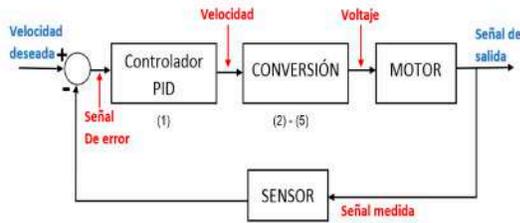


Fig. 14. Diagrama a bloques del control.

C. Diagrama de conexión

En la figura 15 se muestra el diagrama completo de conexión del sistema. Está formado por 5 etapas: 1. fuente de alimentación, 2. Driver para cada motor, 3. Motores *brushless*, 4. Dispositivo embebido y 5. PC.

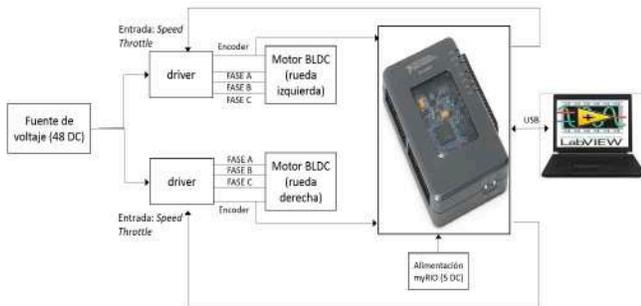


Fig. 15. Diagrama de conexión.

5. RESULTADOS

A. Experimentación

Con el objetivo de validar el desempeño de la implementación mediante instrumentación virtual para el control de velocidad de dos MB con el controlador propuesto (PID), se requirió evaluar diferentes velocidades deseadas en tiempo real. El tiempo de establecimiento T_s , que es el tiempo necesario para que la respuesta del sistema esté dentro de un porcentaje (sobre el 5%) del valor final de la velocidad deseada es de 6 segundos. En las figuras 16 y 17 se puede observar la respuesta en tiempo real de cada una de las ruedas a la variación de velocidades deseadas, se muestra que ambas ruedas se estabilizan al mismo tiempo permitiendo así que el vehículo donde sean ensambladas estas ruedas no tenga deslizamiento cuando esté vaya en trayectoria recta.

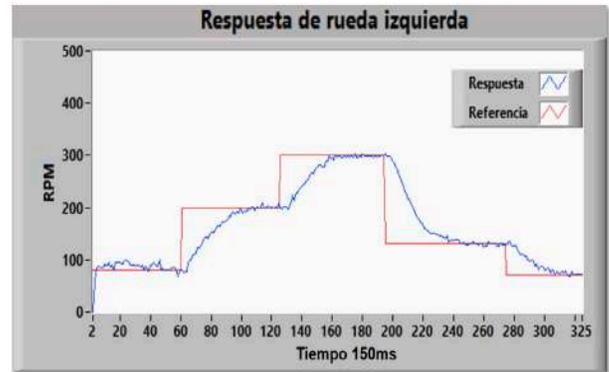


Fig. 16. Respuesta de rueda izquierda.



Fig. 17. Respuesta de rueda derecha.

6. CONCLUSIONES

Se desarrolló la implementación virtual mediante el software LabVIEW y hardware (NI myRIO-1900) para el control de velocidad de dos motores brushless, permitiendo obtener resultados favorables. El sistema desarrollado permite cambiar la velocidad deseada de entre 40-450 RPM en tiempo real. Actualmente se está trabajando en la implementación de un diferencial eléctrico utilizando el controlador propuesto en este artículo con las condiciones de que en trayectoria en línea recta las ruedas giren a la misma velocidad y en trayectoria curva las ruedas giren a diferentes velocidades dependiendo del ángulo del volante.

REFERENCIAS

1. C.-I. Xia, *Permanent magnet brushless DC motor drives and controls* (John Wiley & Sons, 2012).
2. P. Yedamale, *Microchip Technology Inc* **20**, 3 (2003).
3. A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, S. D. Umans, and B. James, *Electric machinery*, vol. 5 (McGraw-Hill New York, 2003).
4. N. Corporation, "Brushless motors," url: <http://www.nidec.com/en-Global/technology/capability/brushless/> (2014). Online; accessed 13 March 2018.
5. B. C. Kuo, *Sistemas de control automático* (Pearson Educación, 1996).
6. K. Ogata, *Ingeniería de control moderna* (Pearson Educación, 2003).
7. L. U. Manual, Austin, TX (1998).
8. J. Zhao and Y. Yu, *MPS, Futur. Analog IC Technol* pp. 7-8 (2011).
9. G. S. P. de Lazárraga, *Control motor Brushless sensorless* (Universidad Pública de Navarra, 2015).
10. N. Instruments, Austin, TX, U.S.A (2015).
11. K. J. Aström and B. Wittenmark, "Computer-controlled systems: theory and design," *Tech. rep.* (1997).