



Sistema de identificación paramétrica para motores de corriente directa

Hernández Paredes José Miguel^{✉1}, Muñoz Barrón Benigno¹, Rodríguez Abreo Omar²

Instituto Tecnológico Superior de Huichapan¹, Instituto Tecnológico de Tlalnepantla²

[✉]jmhernandez@iteshu.edu.mx

Resumen

En el presente artículo se muestra un sistema para la identificación de los parámetros que describen la función de transferencia de un motor de corriente directa. El sistema está compuesto por una tarjeta de adecuación de señales, una tarjeta para la adquisición de datos y una aplicación para computadora que ejecuta el algoritmo de Steiglitz – McBride para la estimación de sistemas lineales; las señales que se requieren adquirir para este trabajo son: velocidad angular en radianes por segundo, corriente de armadura en amperes y el voltaje de alimentación en volts. La relación matemática entre la función de transferencia de un motor de corriente directa y las funciones de transferencia de velocidad y corriente son mostradas. Se presentan los resultados obtenidos en la estimación de la función de transferencia para dos motores de CD, y en la reconstrucción de la respuesta del motor obtenida con los parámetros estimados se obtiene un error cuadrático medio menor a 1.1% en dos motores prueba, lo que hace que el modelo estimado sea ideal para aplicaciones de control.

Palabras clave: Estimación, motor, función de transferencia.

Abstract

In the present article a system for the identification of the parameters that describe the transfer function of a direct current motor is shown. The system consists of a signals adaptation card, a card for data acquisition and a computer application that executes the Steiglitz-McBride algorithm for the estimation of linear systems; The signals that are required to be acquired for this work are: angular speed in radians per second, armature current in amperes and the voltage supply in volts. The mathematical relationship between the transfer function of a direct current motor and the speed and current transfer functions are shown. The results obtained in the estimation of the transfer function for two DC motors are presented, and in the reconstruction of the motor response obtained with the estimated parameters, an average square error of less than 1.1% is obtained in two test motors, which makes the estimated model ideal for control applications.

Keywords: Estimation, motor, transfer function.

1. Introducción

El uso de motores en el diseño y desarrollo de sistemas mecatrónicos es imprescindible ya que estos elementos son los principales actuadores que impulsan los mecanismos que permiten mover componentes articulados, desplazamientos rotacionales para robots móviles, mover pinzas en sistemas de manejo de piezas, entre otras aplicaciones.



En ingeniería es de suma importancia contar con un sistema de ecuaciones en tiempo continuo, discreto o frecuencia que describan el comportamiento de fenómenos físicos, a estas ecuaciones se les conocen como funciones de transferencia (FT), las FT sirven para conocer el comportamiento a nivel simulación en computadora y a partir de estos se diseñan controladores que permiten estimar o predecir el funcionamiento sin poner en riesgo al sistema real.

Los métodos tradicionales de medición de parámetros de motores de corriente directa presentan un gasto de tiempo extra, debido a que estos métodos consisten en la medición separada de los parámetros mecánicos y eléctricos. Entre los trabajos que anteceden al uso del método experimental del algoritmo se encuentran los siguientes:

Entre los métodos experimentales se encuentra diversas técnicas que utilizan el algoritmo de mínimos cuadrados, tal es el caso del trabajo presentado por Samer y Read con el cual se obtiene: la constante mecánica, la constante eléctrica, la resistencia de armadura, la inductancia de armadura, el momento de inercia y el coeficiente de fricción viscosa, sin embargo, requiere el uso de un generador síncrono acoplado [1].

Algunos autores como González et al. muestran un procedimiento experimental simple para estimar los parámetros de las funciones de transferencia, basándose en la respuesta al escalón, de un sistema conformado por un driver de velocidad y un motor de corriente directa de imanes permanentes. El proceso de identificación consistió en la selección de los modelos, la adquisición y pre-procesamiento de los datos, la estimación de parámetros y su validación. Los resultados de este trabajo muestran que es posible estimar los parámetros del sistema a partir de la respuesta al escalón [2]

De manera paralela, algunos investigadores lograron obtener los parámetros de un motor mediante la denominada Metodología del problema inverso, e implementan diversos sistemas de sensado y adquisición de datos, logrando incluso sistemas para la estimación del torque sin sensores mediante un sistema difuso utilizándolo para el desarrollo de un controlador PID difuso de torque para el motor [3].

Así también, se presenta en 2014 un método para la estimación de los parámetros mecánicos de un motor de corriente directa, mediante un algoritmo que analiza el comportamiento dinámico de su velocidad, cuando es sometido a un voltaje nominal, obteniendo parámetros con un error menor al 5 %. Este método solo requiere de un tacogenerador, los sistemas de adquisición y procesamiento de datos, volviéndolo un método simple y de bajo costo [4]

Posteriormente fue descrito un algoritmo que permite calcular los parámetros de un motor y además adaptarlos para casos especiales, donde dichos parámetros puedan variar, para ello, los autores se basan en una ley de control adaptativa denominada "Model Reference Adaptive Control" la cual contiene cuatro partes: el modelo de referencia, el mecanismo de adaptación, la planta y la ley de control [5] .

Otro enfoque son los algoritmos de búsqueda bio-inspirados adaptados, el uso de algoritmos genéticos (GA por sus siglas en inglés) o de un algoritmo de polinización de flores (FPA por sus siglas en inglés) para la obtención de los parámetros dinámicos de un motor de corriente directa, el cual es uno de los algoritmos metaheurísticos más populares, tal es el caso del trabajo presentado por D. Puangdownreong, et al. Donde se demuestra que el FPA permite obtener ocho parámetros del modelo dinámico del motor con una alta precisión [6].

Recientemente el departamento de robótica y automatización de sistemas industriales de la Universidad electrotécnica de San Petersburgo (2018), desarrolló un método para ajustar a las condiciones específicas de operación tres parámetros dinámicos de un motor de corriente directa con la utilización de los datos de la hoja de especificaciones típica de un motor (que ofrece unas condiciones de operación de prueba), la cual otorga el fabricante, validando el método por medio de simulaciones [7].



De acuerdo a la revisión de los antecedentes la identificación de parámetros de un motor de corriente continua es una necesidad en el desarrollo de sistemas mecatrónicos por lo tanto existen diferentes técnicas para obtener los parámetros físicos de estos motores eléctricos, sin embargo en la mayoría de ellos utilizan sistemas de adquisición especializados, o procedimientos matemáticos que utilizan demasiados recursos computacionales, en el presente artículo se propone el desarrollo de una plataforma de estimación paramétrica para motores de corriente directa, a través de la medición física de velocidad angular, voltaje de alimentación y corriente del motor, este sistema se diseñó y desarrolló que se basa en un microcontrolador de gama media y elementos comerciales.

2. Modelado de motor de corriente directa y obtención de parámetros físicos

El uso de motores de corriente continua es muy extenso y variado, podemos encontrar aplicaciones muy básicas como lo son juguetes, ventiladores, bombas, hasta incluso robots industriales y autos. El amplio rango de velocidades, rápida aceleración, desaceleración, cambio de sentido de giro, alto torque a bajas velocidades, la variedad de tamaños y por supuesto el bajo costo de este tipo de motores, hacen que sean uno de los componentes principales en el desarrollo de sistemas automáticos como lo son el control de procesos industriales.

Un motor de corriente directa convierte la energía eléctrica en energía mecánica. Esto se logra cuando la repulsión que ejercen los polos magnéticos de un imán permanente interactúan con los polos magnéticos del rotor.

Los parámetros de un motor de CD de interés al sistema son: resistencia de armadura (R) en Ω , inductancia de armadura (L) en H, constante contra electromotriz (K_a), Constante de torque (K_m), coeficiente de fricción (B) en $\frac{Kg.m^2}{s^2}$ y el momento de inercia (J) en $N.m$.

En la Figura 1 se muestra el diagrama electromecánico de un motor de corriente directa, por lo tanto, se puede analizar la parte mecánica y eléctrica de forma separada lo que permite simplificar el modelo matemático.

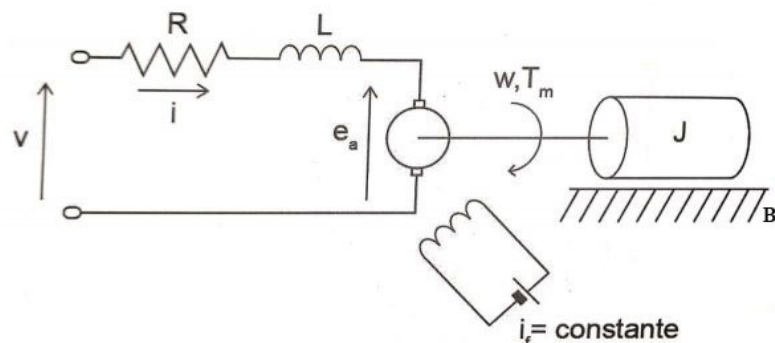


Figura 1. Diagrama del modelo dinámico de un motor de imán permanente [8].

A partir del análisis de la Figura 1 se obtienen cuatro ecuaciones que representan la parte eléctrica (1), la parte mecánica (2), la relación entre la velocidad angular ω con el voltaje inducido en la armadura E_a (3) y la relación entre el torque mecánico T_m con la corriente eléctrica i (4).



$$L \frac{di(t)}{dt} = v(t) - Ri(t) - E_a(t) \quad (1)$$

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = T_m(t) - B\omega(t) \quad (2)$$

$$E_a(t) = K_a \omega(t) \quad (3)$$

$$T_m(t) = K_m i(t) \quad (4)$$

A las ecuaciones (1), (2), (3) y (4) se le aplica la transformada de Laplace para obtener sus representaciones en el dominio S :

$$sLi(s) = v(s) - Ri(s) - E_a(s) \quad (5)$$

$$sJ\omega(s) = T_m(s) - B\omega(s) \quad (6)$$

$$E_a(s) = K_a \omega(s) \quad (7)$$

$$T_m(s) = K_m i(s) \quad (8)$$

Para la obtención de los parámetros de motor de corriente directa se utiliza la función de transferencia de corriente con respecto al voltaje. De la ecuación (6) se despeja $\omega(s)$ y se sustituye (8).

$$\omega(s) = \frac{K_m i(s)}{Js+B} \quad (9)$$

Se sustituye la ecuación (9) en (7).

$$E_a(s) = K_a K_m i(s) \frac{1}{Js+B} \quad (10)$$

Se sustituye la ecuación (10) en (1).

$$sL(s) = v(s) - Ri(s) - K_a K_m i(s) \frac{1}{Js+B} \quad (11)$$

De la ecuación (11) se obtiene la relación corriente contra voltaje.

$$\frac{i(s)}{v(s)} = \frac{Js+B}{(Ls+R)(Js+B)+K_a K_m} \quad (12)$$

Simplificando (12).

$$\frac{i(s)}{v(s)} = \frac{Js+B}{s^2 JL+s(LB+JR)+RB+K_a K_m} \quad (13)$$

Normalizando la función de transferencia.

$$\frac{i(s)}{v(s)} = \frac{1/Ls+B/JL}{s^2+s(B/J+R/L)+^{(RB+K_a K_m)}/JL} \quad (14)$$

A partir de la ecuación (14) se propone la siguiente función de transferencia que a la vez se estimará con el método de identificación Steiglitz - McBride (el cual se explica en la siguiente sección).



$$\frac{i(s)}{v(s)} = \frac{a_1 s + a_2}{s^2 + a_3 s + a_4} \quad (15)$$

donde:

$$a_1 = 1/L; a_2 = B/JL; a_3 = (B/J + R/L); a_4 = (RB + K_a K_m)/JL \quad (16)$$

2.1 Obtención de la inductancia estimada L_e

Al igualar los coeficientes las ecuaciones (14) y (15) se obtiene que:

$$L_e = a_1^{-1} \quad (16)$$

2.2 Obtención de la resistencia estimada R_e

$$R_e = \frac{a_1 a_3 - a_2}{a_1^2} \quad (17)$$

2.3 Obtención de la constante de armadura K_{ae} y constante de torque K_{me}

De la ecuación (7) se sabe que la esta constante relaciona la velocidad angular del motor con el voltaje inducido en la armadura cuando el motor alcanzó velocidad nominal, entonces:

$$K_{ae} = \frac{E_a}{\omega} = K_{me} \quad (18)$$

2.4 Obtención de la constante de momento de inercia J_e

$$J_e = \frac{K_{ae}^2}{\frac{R_e^2}{L_e} + a_4 L_e - a_3} \quad (19)$$

2.5 Obtención de la constante de coeficiente de fricción B_e

$$B_e = (a_3 - \frac{R_e}{L_e}) J_e \quad (20)$$

3. Algoritmo de Steiglitz – McBride

El método de identificación de Steiglitz-McBride, (también conocido como método de mínimos cuadrados recursivo) intenta minimizar el error cuadrático obtenido a través de un proceso iterativo, prefiltrando la entrada y las salidas medidas del sistema, calculando los parámetros que definen un filtro digital equivalente al sistema y posteriormente, toma los resultados obtenidos en la iteración actual como punto de partida de la siguiente. Este proceso se resume en los siguientes pasos:

1.- En el primer paso filtra tanto la entrada de voltaje, como las salidas de corriente o velocidad angular con un filtro definido con una función de transferencia racional, la cual está determinada por $D_n(z)^{-1}$, donde $D_n(z)$ es el polinomio definido por los coeficientes iniciales y n es el número de iteración.



2.- Con este filtro se obtienen nuevas señales de entrada y salida, con las cuales se puede calcular un error, para así tener la diferencia de las señales originales con las señales obtenidas por el filtro, el objetivo del método es minimizar este error.

3.- Se estiman nuevos coeficientes y se repite el proceso.

Considere un sistema en tiempo discreto de la forma (21) que representa a un modelo ARX [10],

$$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})}u(t) + r(t) \quad (21)$$

donde $y(t)$ es la salida al tiempo t , $u(t)$ la entrada, $r(t)$ un proceso estocástico de orden finito, con media cero actuando como un disturbio q^{-1} es el operador de retardo unitario y $A(q^{-1})$ y $B(q^{-1})$ son polinomios de la forma que se muestra en las ecuaciones (22) y (23).

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{na}q^{-na} \quad (22)$$

$$B(q^{-1}) = b_1q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb} \quad (23)$$

En la Figura 2 se muestra el diagrama a bloques del funcionamiento del algoritmo de Steiglitz – McBride, en el cual se propone la solución en dos pasos para la implementación.

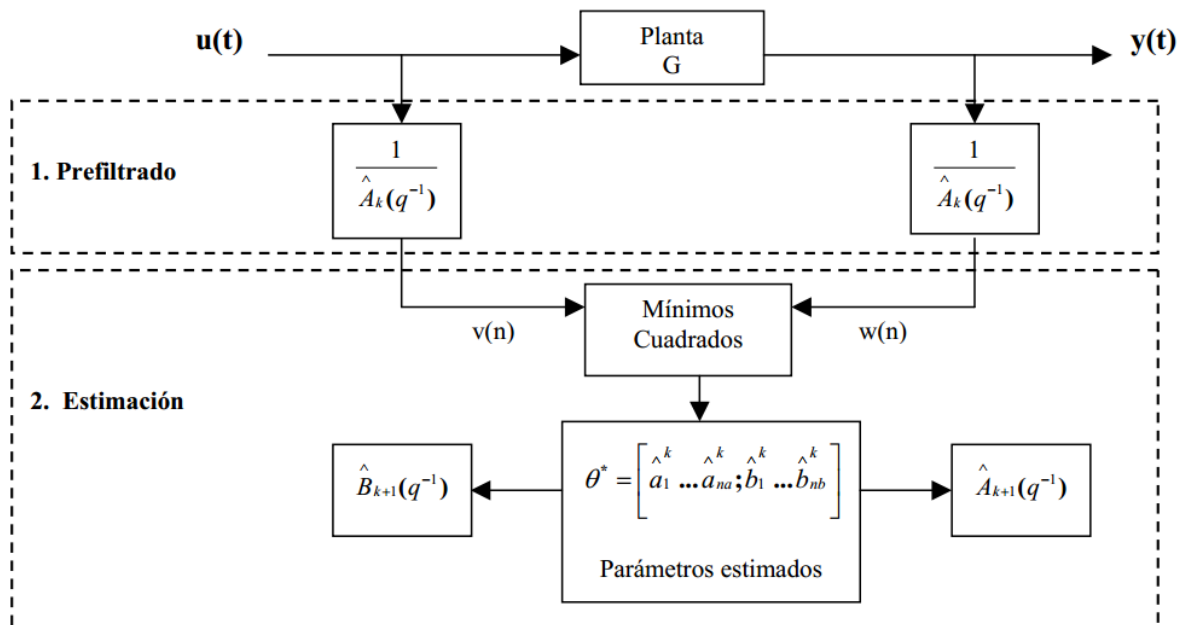


Figura 2. El algoritmo de Steiglitz – McBride [11].

4. Sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos se trata de una tarjeta de desarrollo de diseño propio con microcontrolador PIC18F4550 de la firma **Microchip** (ver Figura 3), y una tarjeta electrónica para adecuar las señales provenientes del motor como voltaje y corriente de armadura (ver Figura 4), las principales características del sistema de adquisición de datos se enuncian a continuación:

- Voltaje de operación 5VDC

- Velocidad de CPU 48MHz
- Memoria SRAM de 128KB 23LC1024
- ADC de 8 canales de 12 bits mcp3208
- DAC de 2 canales de 12 bits mcp4922
- Pantalla LCD 2x16
- Conectividad Bluetooth
- Conectividad RS232
- Conectividad SPI
- Conectividad I2C
- Conectividad USB en modo Bulk
- Indicador RGB
- Salidas PWM
- Lector de encoder de cuadratura
- Sistema de *bootloader*

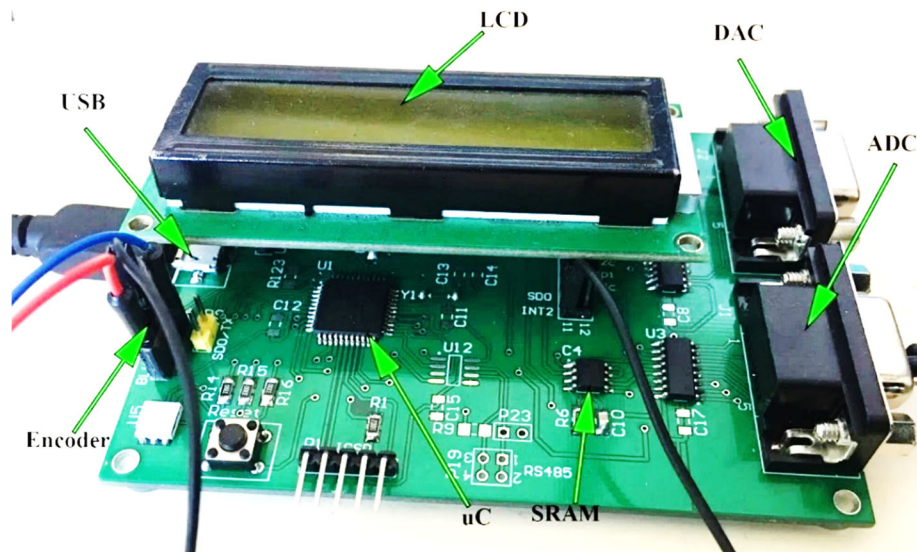


Figura 3. Tarjeta de adquisición de datos.

La tarjeta de adecuación de señales tiene las siguientes especificaciones técnicas:

- Voltaje de operación 12VDC con regulación a 5VDC.
- Lectura de voltaje de armadura de 0 a 12VDC, con filtro pasa bajas.
- Lectura de corriente de -5 a 5 ACD con filtro pasa bajas.
- Conectividad directa al motor de corriente directa.
- Protección contra inversión de voltaje.

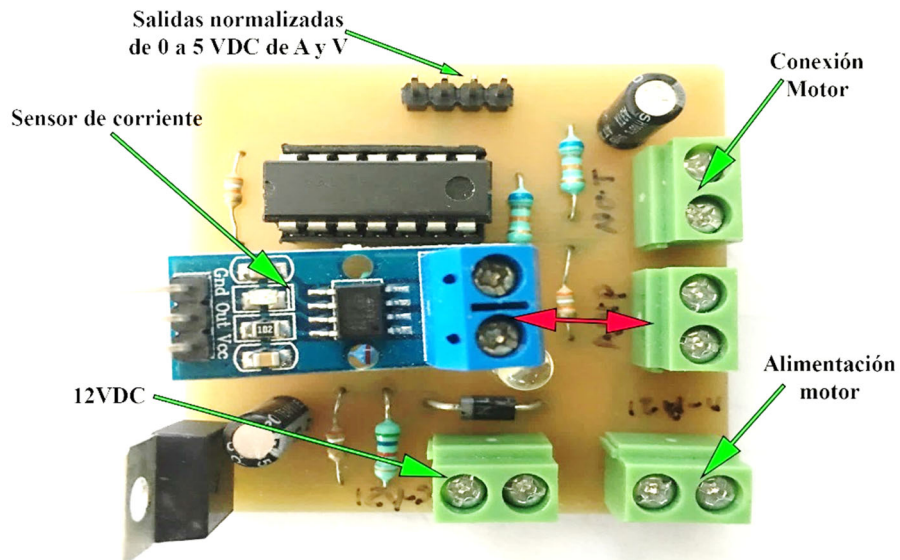


Figura 2. Tarjeta de adecuación de señales para voltaje y corriente.

En la Figura 5 se muestra el diagrama esquemático general de conexión entre la adecuación de señales, el sistema de adquisición de datos y la interface hombre-máquina para realizar la identificación de parámetros físicos que en este trabajo se propone.

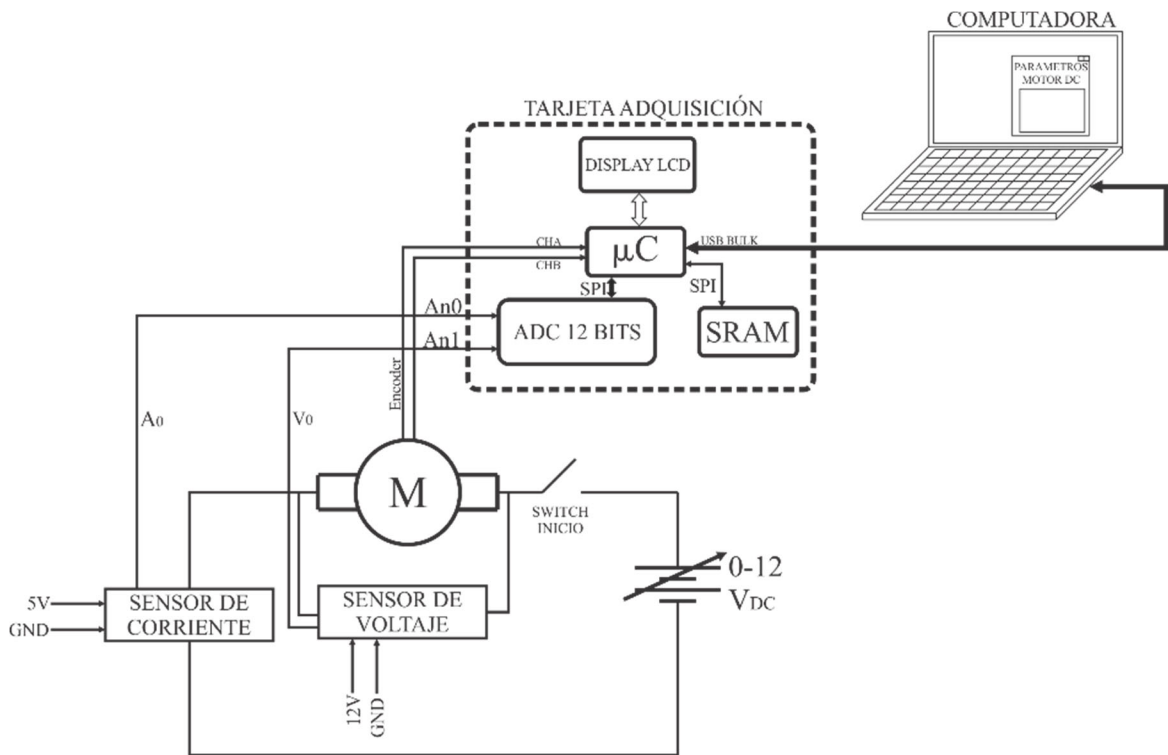


Figura 5. Diagrama esquemático de conexiones.



5. Metodología de identificación paramétrica

La metodología de identificación paramétrica es una serie de pasos que se realizan en conjunto con la etapa de adecuación de señales, sistema de adquisición de datos y una interfaz gráfica en MATLAB la cual se ejecuta de la siguiente manera:

1. Conectar el motor a la tarjeta de adecuación de señales para obtener voltaje y corriente.
2. Conectar el sensor de cuadratura a la tarjeta de adquisición de señales.
3. Alimentar el motor al voltaje máximo.
4. Adquirir y guardar las muestras de voltaje, corriente y velocidad en datos crudos en memoria temporal.
5. Enviar y procesar los datos muestreados de velocidad [$rads/s$], voltaje [V] y corriente [A] en MATLAB a través de conexión USB BULK.
6. Calcular los coeficientes en tiempo discreto correspondiente a la corriente como salida y al voltaje como entrada con el algoritmo de Steiglitz – McBride y convertirlos en una función de transferencia en el dominio Z.
7. Trasladar la función de transferencia al dominio S y calcular los parámetros del motor con las ecuaciones (16) a la (20).
8. Calcular la función de transferencia estimada de corriente y velocidad para compararlas con las señales adquiridas y así validar los parámetros estimados.

6. Interfaz gráfica de usuario

Uno de los propósitos de este trabajo es contar con un prototipo que permita al usuario obtener los parámetros físicos de un motor con tan solo hace un clic en una interfaz de usuario por tal motivo se diseñó y desarrolló una GUI que cumpla con este propósito, en la Figura 6 se muestra la interfaz desarrollada en el software matemático MATLAB.

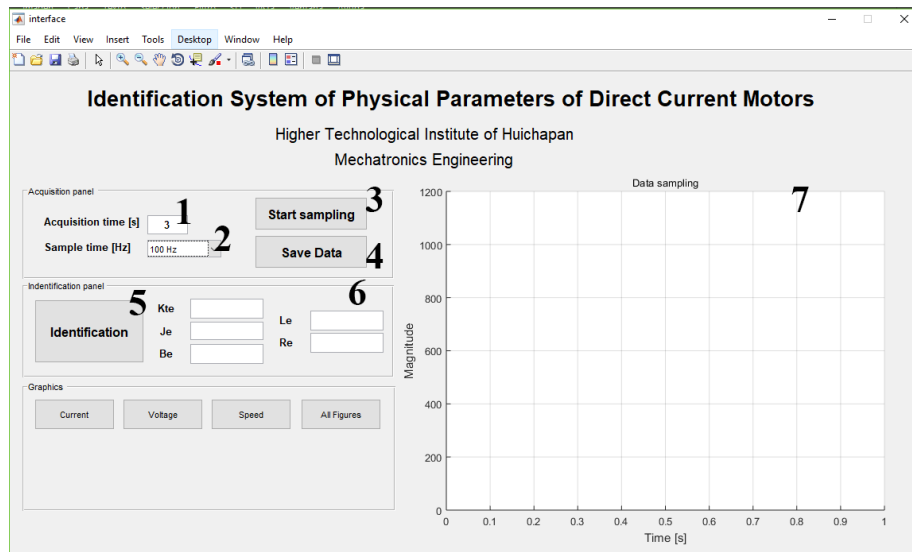


Figura 6. Interfaz gráfica de usuario.

En la Figura 6 se muestran las características de esta interfaz, con el número 1 se puede modificar el tiempo que dura la adquisición de datos, en 2 se puede modificar la frecuencia de muestreo, en 3 se inicia el proceso de muestreo y al terminar se reciben los datos en formato crudo para después procesarlos en las unidades correspondientes, en 4 se pueden guardar los datos en un archivo de texto para su posterior análisis, en 5 se ejecuta la identificación paramétrica y los resultados de la estimación se muestran en 6, posteriormente en 7 se grafican las funciones de transferencia estimadas de corriente y velocidad contra las señales reales.

7. Resultados

En esta sección se mostrarán los diferentes resultados que se obtuvieron con el desarrollo este trabajo a una velocidad de adquisición de 1 kHz, con la implementación de las ecuaciones (16) a la (20) se encontraron los siguientes parámetros (Tabla 1) para el motor mostrado en la Figura 7, este motor es de la marca Mavilor modelo CML-050.

Tabla 1. Parámetros CML-050.

Parámetro	Valor	Unidad
R_e	3.0031	Ω
L_e	0.013556	H
K_{ae}	0.0477	-
B_e	0.00014525	$\frac{Kg \cdot m^2}{s^2}$
J_e	0.0000090011	$N \cdot m$



Figura 7. Motor de CD CML-050.

Para la estimación de estos parámetros se adquirieron las señales que se muestran en la Figura 8, 9 y 10, en las cuales se muestra la corriente, el voltaje y la velocidad respectivamente, cabe resaltar que las señales de voltaje y corriente tiene un filtro previo por hardware, mientras que la señal de velocidad se muestra sin filtrar. La adquisición de estos datos se realiza a un voltaje de alimentación al motor de 10.5 VDC para evitar la saturación en el sistema de instrumentación.

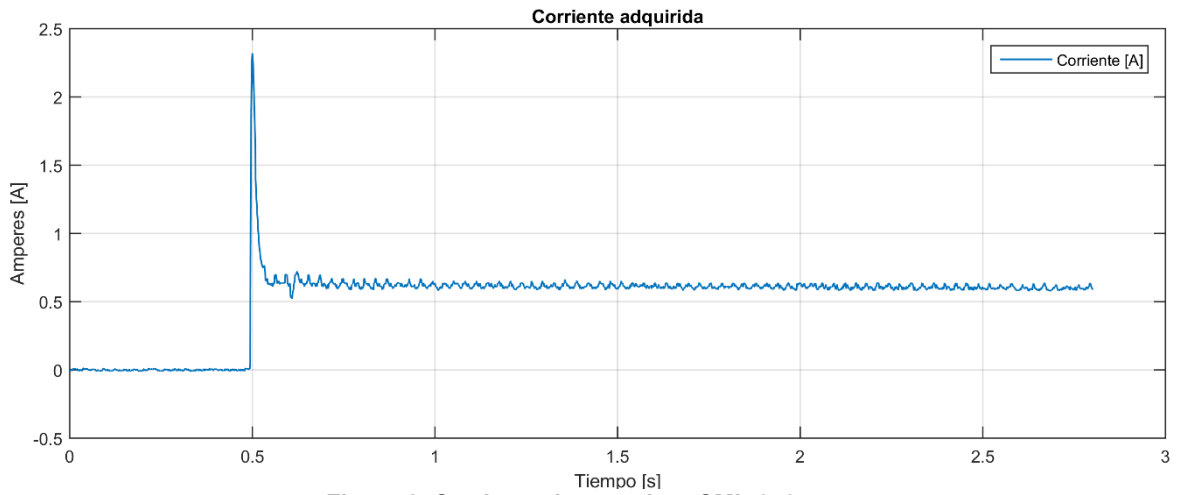


Figura 8. Corriente de armadura CML-050.

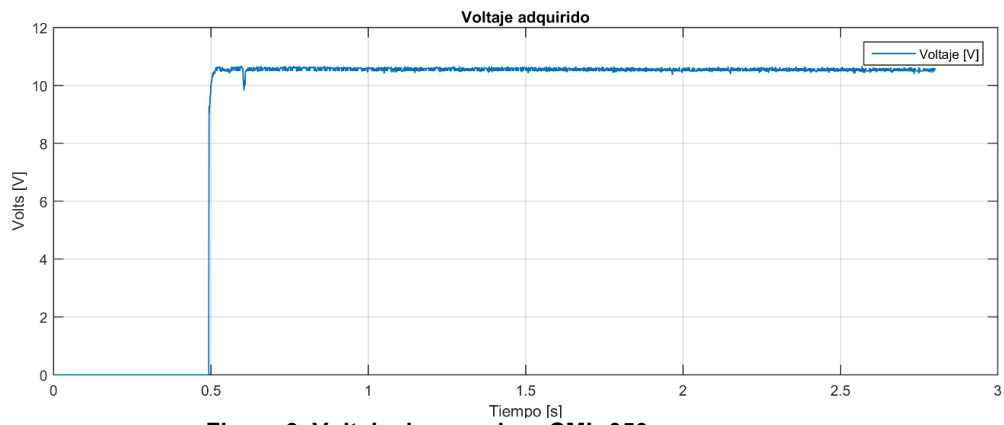


Figura 9. Voltaje de armadura CML-050.

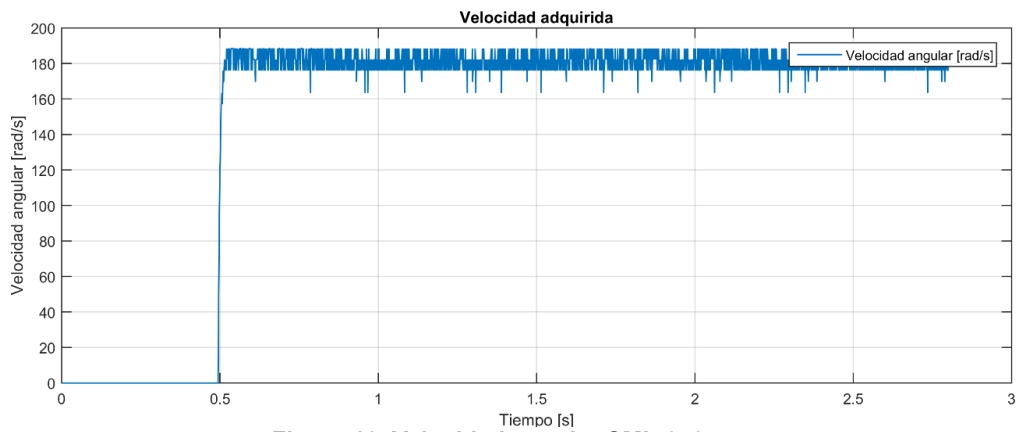


Figura 10. Velocidad angular CML-050.

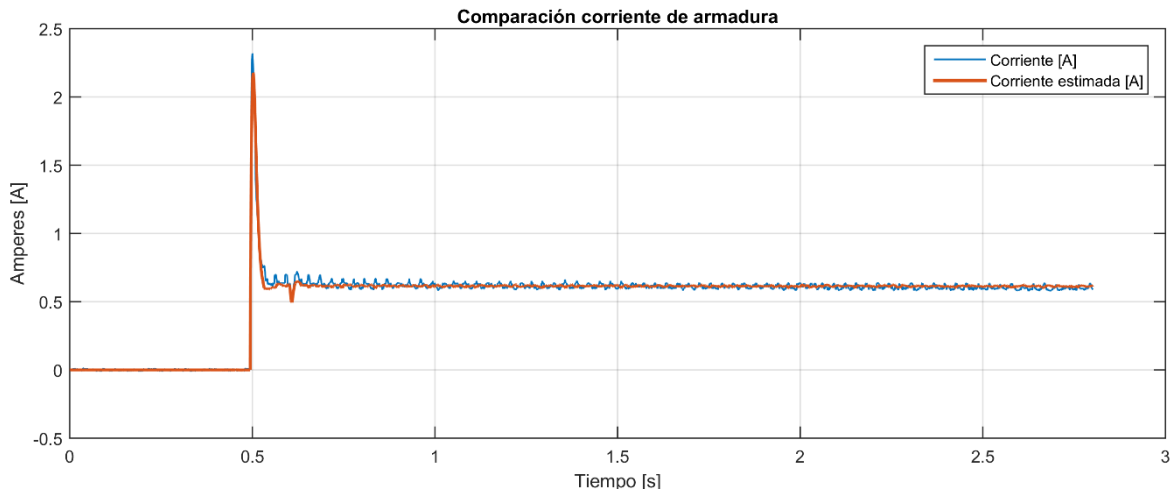


Figura 11. Comparativa de la corriente real y estimada CML-050.

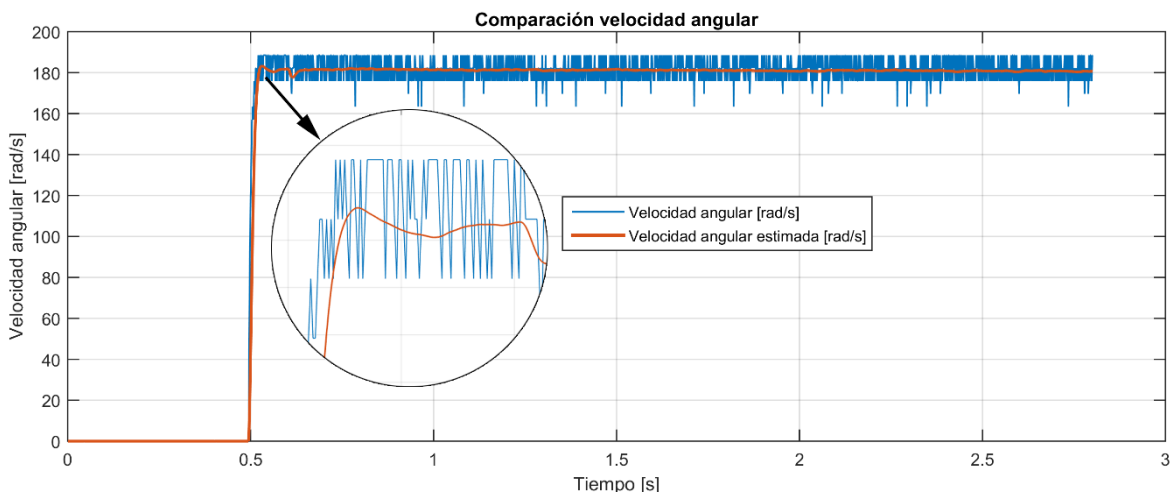


Figura 12. Comparativa de la velocidad real y estimada CML-050.

En las Figuras 11 y 12 se presenta las comparaciones de la corriente y velocidad real contra las funciones de transferencia estimadas respectivamente, se utiliza la técnica estadística del error cuadrático medio para conocer la incertidumbre entre las señales reales y estimadas, dando como resultado el 0.4443 % de error en velocidad angular y 0.1573 % en corriente.

Se realizó una segunda prueba con un motor RMCS2004 de la marca Robokits (ver Figura 13) donde se obtuvieron los parámetros de la Tabla 2.

Tabla 1. Parámetros RMCS2004.

Parámetro	Valor	Unidad
R_e	0.921042	Ω
L_e	0.007759	H
K_{ae}	0.073472	-
B_e	0.000678	$\frac{Kg \cdot m^2}{s^2}$

J_e	0.000136	$N.m$
-------	----------	-------



Figura 13. Motor de CD RMCS2004.

Para la estimación de estos parámetros se adquirieron las señales que se muestran en la Figura 14, 15 y 16, en las cuales se muestra la corriente, el voltaje y la velocidad respectivamente. La muestra de datos se realiza a un voltaje de alimentación de motor de 9.1 VDC.

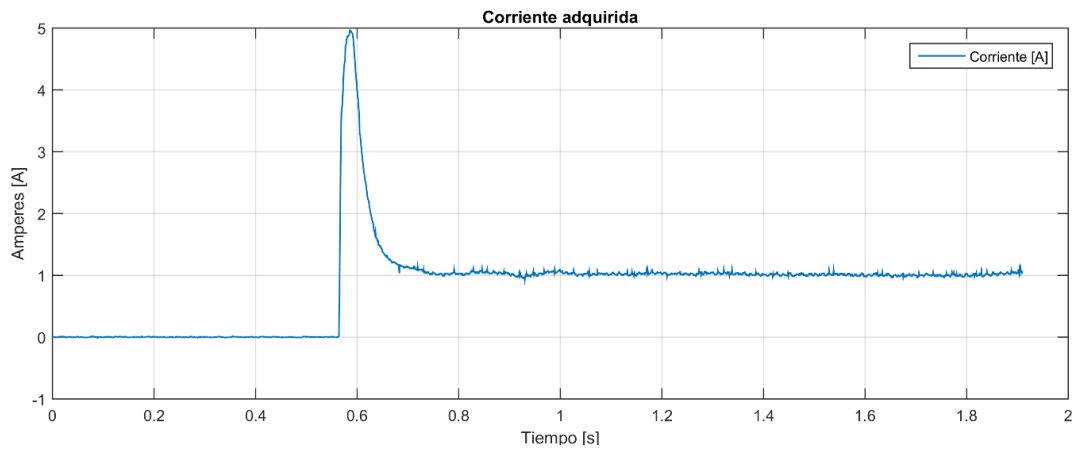


Figura 14. Corriente de armadura RMCS2004.

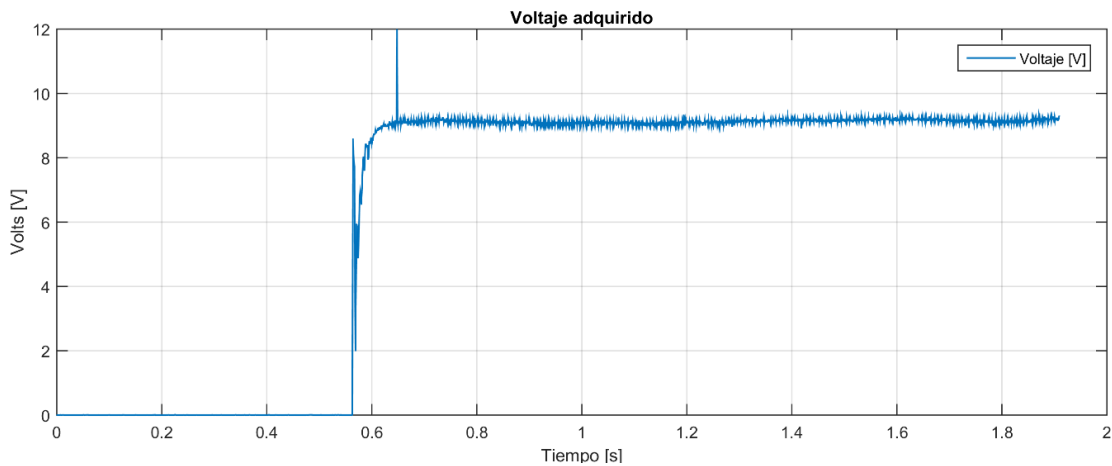


Figura 15. Voltaje de armadura RMCS2004.

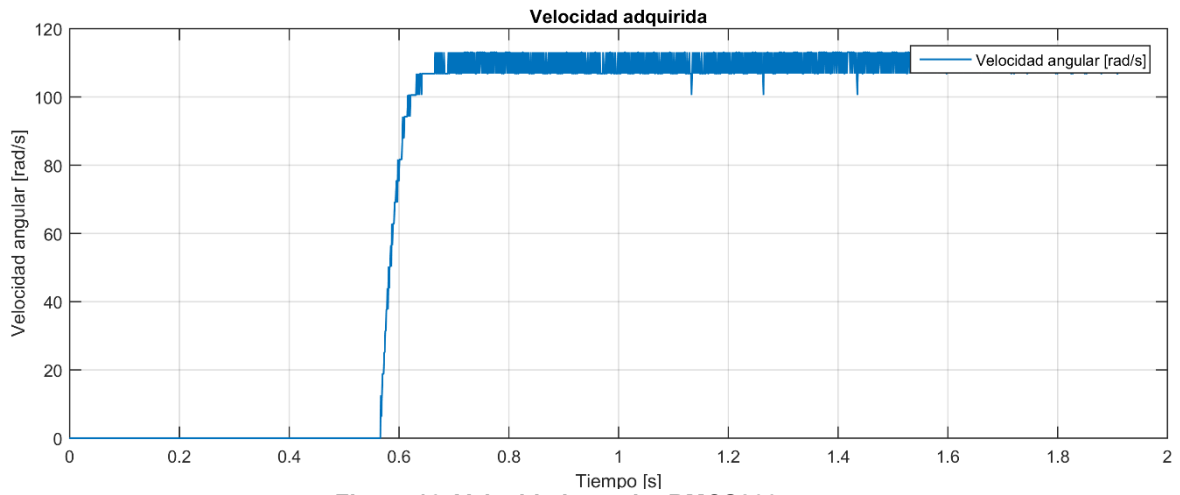


Figura 16. Velocidad angular RMCS2004.

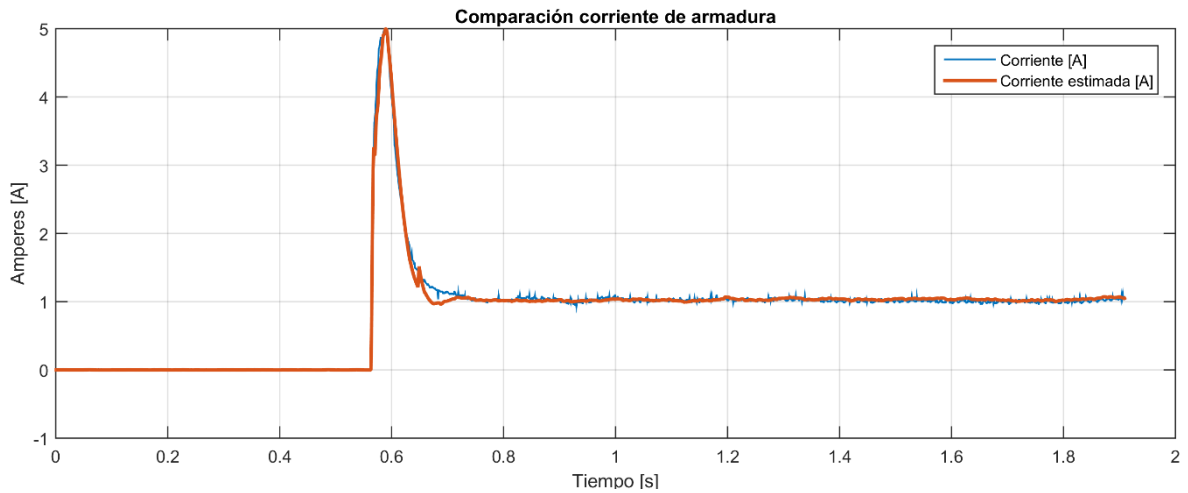


Figura 17. Comparativa de la corriente real y estimada RMCS2004.

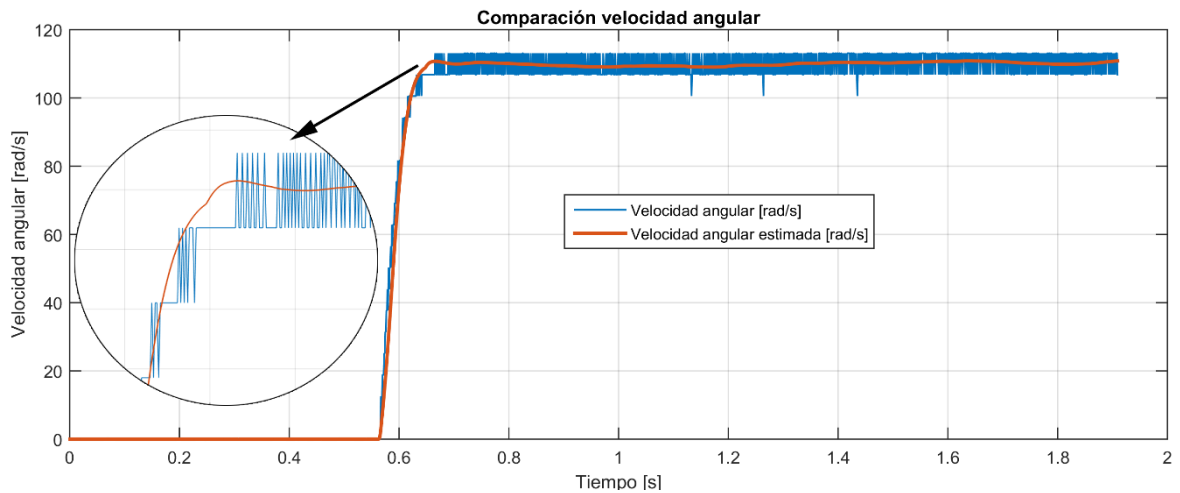


Figura 18. Comparativa de la velocidad real y estimada RMCS2004.



En las Figuras 17 y 18 se presenta las comparaciones de la corriente y velocidad real contra las funciones de transferencia estimadas respectivamente, se utiliza la técnica estadística del error cuadrático medio para conocer la incertidumbre entre las señales reales y estimadas, dando como resultado el 0.003758% de error en velocidad angular y 1.0955 % en corriente.

8. Conclusiones

El trabajo presentado muestra un sistema de identificación paramétrica para motores de corriente directa que utiliza el método de Steiglitz – McBride. Se presentó la relación matemática entre los parámetros del motor y las funciones de transferencia de velocidad y corriente. Para la adquisición de datos se desarrolló un sistema propio que se basa en un microcontrolador y los datos fueron procesados en un programa en una computadora personal que ejecuta el método expuesto. La respuesta calculada a partir de los parámetros estimados sometidos a la entrada de voltaje medido físicamente en los dos motores en los que se realizaron pruebas tienen un error cuadrático medio menor al 1% en el primer motor y menor al 1.1% para el segundo motor, por lo que el modelo matemático estimado de cada uno de los motores es adecuado para ser utilizado para tareas de diseño de controladores. Es importante resaltar que el sistema presentado requiere solamente de la conexión del motor para realizar las pruebas de identificación, mientras que las tareas de recolección de datos y análisis de los mismos son realizadas de forma automática gestionados por el programa en la computadora.

En las pruebas de estimación paramétrica se detectó que a partir de 500 Hz en frecuencia de muestreo las constantes del motor no cambian, por tal motivo se elige una frecuencia de muestreo de 1 KHz para asegurar que los datos adquiridos de velocidad, voltaje y corriente de motor sean confiables en el proceso de identificación, y al comparar las señales reales con las señales simuladas con los valores estimados se logra observar que las funciones de transferencia de corriente y velocidad empatan con un error porcentual menor al 2%.

El sistema de adquisición de datos tiene limitantes físicas como cualquier otro sistema de hardware diseñado con el mismo propósito, con un convertidor analógico digital de 12 bits se pueden detectar cambios en señales analógicas de 1.22 [mV] con voltaje de referencia de 5 [V], lo que conlleva la medición de estas de una forma más precisa en comparativa con convertidores de 8 bits o 10 bits que logran medir cambios 19.6 [mV] y 4.8 [mV] respectivamente.

En la siguiente etapa de esta investigación se utilizarán los modelos obtenidos para la aplicación en robótica, principalmente para robots móviles terrestres en los que el control de velocidad, posición, y torque es una tarea prioritaria para obtener su posición y orientación en un espacio determinado.

Referencias

- [1] S. Saab and R. Abi Kaed-Bey, Parameter identification of a DC motor: An experimental approach, vol. 2. 2001.
- [2] J. C. González, A. J. Saavedra-Montes, and C. Ramos-Paja, Identificación de un Motor de Corriente Directa de Imanes Permanentes a Partir de un Único Experimento. 2013.
- [3] D. T. Liem and K. K. Ahn, "DC Motor Parameters Identification and Sensorless Torque Estimation Using Fuzzy PID," Control. Autom. Syst., no. 12, pp. 76–81, 2012.
- [4] R. Beloiu, "Dynamic determination of DC motor parameters-Simulation and testing," Proc. 2014 6th Int. Conf. Electron. Comput. Artif. Intell. ECAI 2014, pp. 13–18, 2014.
- [5] M. A. Akbar, "Based on Simulink," 2016 6th Int. Annu. Eng. Semin., pp. 101–106, 2016.
- [6] D. Puangdownreong, "Application of Flower Pollination Algorithm to Parameter Identification of DC Motor Model," no. March, pp. 8–10, 2017.



- [7] F. S. Al-mahturi, D. V Samokhvalov, and V. M. Bida, "Parameters Identification of a Brushless DC Motor by Specification," 2018 IEEE Conf. Russ. Young Res. Electr. Electron. Eng., pp. 558–561, 2018.
- [8] Solis F. y Bañuelos M., Caracterización de un motor de corriente directa, Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 1-2, 2010.
- [9] K. Steiglitz and L. E. McBride, A Technique for the Identification Linear Systems, National Science Foundation Grant, IEEE Transactions on Automatic Control, Volume AC-10, Number 4, pp. 461-464, 1965.
- [10] P. Stoica, T. Söderström, The Steiglitz-McBride identification algorithm: Revised- Convergence analysis and accuracy aspects, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 26, pp. 712-717, 1981.
- [11] Rico F. H., Estimación de los parámetros físicos de un motor de corriente directa usando el algoritmo de Steiglitz-McBride," Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, México, DF, noviembre. Pp. 15-31, 2005.