

CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS DE UN MOTOR ELÉCTRICO DE CORRIENTE DIRECTA MEDIANTE PRUEBAS EXPERIMENTALES

PARAMETERS CHARACTERIZATION OF A DIRECT CURRENT ELECTRIC MOTOR THROUGH EXPERIMENTAL TESTS

Alcocer-Lázaro A.¹, Rodríguez-López G.¹, Valenzuela-Murillo F.^{1*}, Ramírez-Betancour R.¹, Martínez-Solís F.¹ y Juárez-Zirate S.¹

¹División Académica de ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
* Avenida Universidad s/n Zona de la Cultura, Colonia Magisterial CP 86690 Villahermosa Centro
Tabasco México

*fredy.valenzuela@ujat.mx

RESUMEN

En la presente investigación se implementa un procedimiento sencillo y confiable para caracterizar los motores de corriente directa con excitación separa.

Los motores de corriente directa son ampliamente utilizados en la industria para realizar procesos en los que se requiere precisión y eficiencia, para esto es indispensable conocer cada uno de los parámetros que caracterizan el funcionamiento del motor.

En este trabajo se propone la utilización de equipos básicos de laboratorio para estimar los parámetros de un motor de corriente directa a través de pruebas experimentales. Los parámetros obtenidos son validados con resultados de simulación y con pruebas experimentales de laboratorio.

PALABRAS CLAVE

Caracterización, Motor DC, Modelo Matemático, pruebas experimentales.

ABSTRACT

In this work, a simple and reliable procedure is implemented to characterize the DC motors with separate excitation.

Direct current motors are widely used in the industry to carry out processes in which precision and efficiency are required. Then, it is essential to know all the parameters that characterize the motor operation.

In this work, the use of basic laboratory equipment is proposed to estimate the direct current motor parameters through experimental tests. The parameters obtained are validated with simulation results and with experimental laboratory tests.

KEYWORDS

Characterization, DC Motor, Mathematical Model, experimental tests.

INTRODUCCIÓN

El motor de corriente directa (Motor CD) es uno de los actuadores industriales más comúnmente utilizados para realizar procesos en los que se requiere precisión y eficiencia. Esto se debe a que los motores de CD pueden ser controlados con relativa facilidad, pueden desarrollar un alto par con bajas velocidades y son muy versátiles. Sin embargo, para un control preciso es necesario representar el comportamiento dinámico y estacionario de los fenómenos que se presentan durante la operación del motor de CD. Lo cual generalmente se lleva a cabo por medio de un conjunto de ecuaciones matemáticas llamado modelo. Este modelo representa el comportamiento de las variables físicas (eléctricas y mecánicas) involucradas en la operación y funcionamiento del motor de CD.

La precisión del modelo depende en gran medida del detalle con que representen los fenómenos involucrados en el motor de CD. Lo cual exige que los valores de los parámetros físicos correspondan a los valores reales del motor. La determinación

de estos valores es conocida como caracterización del motor de CD.

La caracterización de un motor de CD se basa en conocer los parámetros que influyen en el funcionamiento de la máquina, entre los cuales están inmersos factores mecánicos y eléctricos.

En ese sentido, se han desarrollado trabajos utilizando una técnica de estimación basada en la Serie de Walsh para la determinación de parámetro de Sistemas Lineales e Invariantes en el Tiempo (SLIT) [1]. Las ecuaciones diferenciales de primer orden se transforman a ecuaciones algebraicas mediante la matriz operacional de integración. Esta metodología es aplicada a un motor de CD de imán permanente de 12 V a 120 W. Los resultados reportados muestran valores muy cercanos a los reales, con un error máximo del orden de 4%.

Otras propuestas para determinar los parámetros del motor de CD se basan en la medición de velocidad a la respuesta escalón utilizando la serie de Taylor [2]. Lo cual permite expresar la función de transferencia de velocidad (con y sin perturbación del par mecánico) en el dominio del tiempo. A partir de la medición

de la velocidad se determinan los siguientes parámetros: constante del torque del motor, constante de tiempo mecánica, constante de tiempo eléctrica y la constante de fricción.

Adicionalmente, el algoritmo de Steiglitz-Mcbride a través de la función "stmcb", que pertenece a las librerías de Matlab®, es utilizado para estimar los parámetros eléctricos y mecánicos del motor de CD [3]. Para esto, se utilizan las mediciones de las variables de estado (velocidad y corriente de armadura) y el voltaje aplicado. Los resultados obtenidos poseen un error máximo de alrededor de 9%.

En este trabajo se propone la estimación de parámetros eléctricos y mecánicos del motor de CD a través de las pruebas experimentales de laboratorio de resistencia óhmica, operación en vacío y operación con carga. Por medio de las cuales se miden las siguientes variables: la velocidad de rotor, la corriente y el voltaje de los devanados de campo y armadura. Las mediciones se realizan en un tiempo cuando se ha alcanzado el estado estable, con equipo de laboratorio de uso común (convencional) e instrumentación simple. Lo cual permite

una implementación sencilla y de bajo costo con resultados muy cercanos a los valores reales. La propuesta se aplicó a un motor de CD de $\frac{3}{4}$ hp, 120 V a 1800 rpm del módulo de entrenamiento de LabVolt®.

METODOLOGÍA

Modelo matemático del motor de CD. El motor eléctrico de CD es una máquina que transforma la energía eléctrica en energía mecánica a través de un eje acoplado al rotor. El proceso de modelado matemático se realiza considerando el funcionamiento del sistema eléctrico y del sistema mecánico.

En la **Figura 1** se muestra el circuito equivalente de un motor de CD con excitación separada, que está compuesto por un rotor y un estator [4]. El voltaje de alimentación al rotor (también conocido como armadura), está representado por v_a . La corriente que circula por las bobinas de armadura es i_a y la fuerza contraelectromotriz queda representada por E . La resistencia y la inductancia del circuito de armadura son dadas por R_a y L_a , respectivamente. Finalmente, los valores v_f , i_f , L_f y R_f corresponden al voltaje, corriente, inductancia y resistencia

del circuito de campo del estator de la máquina.

Las características mecánicas de la máquina se representan a través de la velocidad angular del rotor (ω), el momento de inercia del rotor (J) y el coeficiente de rozamiento viscoso (β).

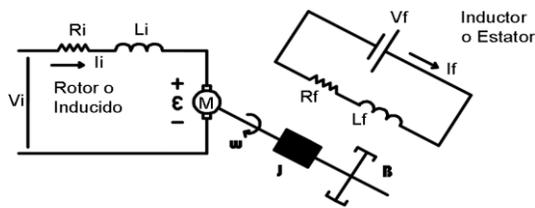


Figura 1. Circuito equivalente del motor de CD con excitación separada.

Aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff, ley de Newton y realizando operaciones algebraicas se obtiene el modelo matemático que representa la dinámica de la corriente de armadura y la velocidad de rotación:

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{K_e}{L_a} \omega - \frac{R_a}{L_a} i_a + \frac{1}{L_a} v_a \quad (1)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{\beta}{J} \omega + \frac{K_m}{J} i_a - \frac{1}{J} \tau_c \quad (2)$$

Caracterización de los parámetros del motor de CD. Los parámetros de un motor de CD son específicos para cada máquina. Para determinar estos parámetros se utilizó un motor/generador CC del módulo de entrenamiento didáctico

Lab-Volt (**Figura 2**) e instrumentos de medición, de uso común, de laboratorio de máquinas eléctricas. Los valores nominales de este motor se muestran en la **Tabla 1**.



Figura 2. Módulo de entrenamiento Lab-Volt, Motor / Generador CD.

Tabla 1. Valores nominales del motor de CD de Lab-Volt.

Valores Nominales	
v_n	120 V
P_n	$\frac{3}{4}$ hp
T_n	0.9 N · m
n_n	1800 rpm

Determinación de la resistencia de armadura (R_a). Esta prueba se realiza utilizando una fuente de voltaje variable y dos multímetros digitales tal como se muestra en la **Figura 3**.



Figura 3. Circuito para calcular resistencia de armadura.

Se aplicaron diferentes valores de voltaje al circuito de armadura y se midieron los valores de corriente para cada voltaje aplicado. Con las mediciones y utilizando técnica de regresión lineal, se ajustan los datos a la ecuación de la recta. Para esto se utiliza la herramienta de ajuste de tendencia lineal de Excel.

Determinación de la resistencia de campo (R_f). El valor de la R_f se obtiene a través de un procedimiento similar al que se describe para obtener la R_a , utilizando el circuito mostrado en la **Figura 4**.



Figura 4. Circuito para calcular resistencia de campo.

Determinación de la inductancia de armadura y de campo (L_a y L_f). Los valores de las inductancias se obtienen por mediciones utilizando el equipo LRC Meter en el devanado de armadura y en el devanado de campo, tal como se muestra en la **Figura 5**.



Figura 5. Circuito de armadura con LCR Meter.

La prueba con el equipo LRC Meter se basa en la aplicación de un voltaje de CA a una frecuencia fija para obtener la impedancia e inductancia del circuito.

Determinación de las constantes de la fuerza contraelectromotriz (K_e) y del torque electromecánico (K_m). La constante K_e es definida como la relación del voltaje suministrado y la velocidad de giro del eje del motor. Para determinar su valor, se utiliza la ecuación (1) en estado estable ($\frac{di_a}{dt} = 0$):

$$K_e = \frac{v_a - R_a i_a}{\omega} \quad (3)$$

El procedimiento para determinar K_e se lleva a cabo mediante la ecuación (3) y

utilizando los valores de las mediciones de i_a y ω para un rango de v_a de 15 a 34 VDC. Es importante mencionar que para esta prueba el motor de CD se hace funcionar sin carga (en vacío), tal como se ilustra en la **Figura 6**.

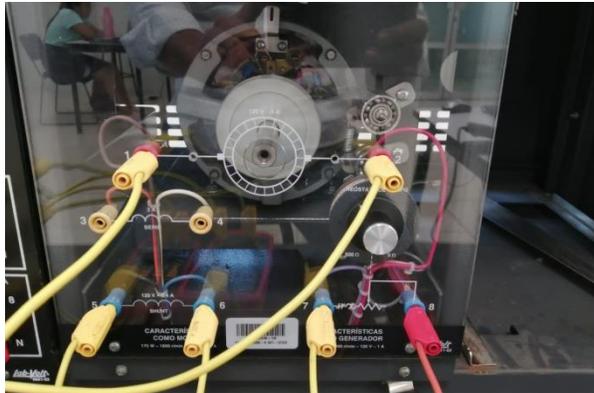


Figura 6. Prueba del motor de CD sin carga.

Cálculo del coeficiente de fricción viscosa (β). La fricción se define como la fuerza que se opone al movimiento de un cuerpo sobre una superficie. En el motor de CD, esta fuerza se origina por el flujo del aire circulando por las masas del rotor y del estator. El coeficiente de fricción viscosa se obtiene a partir la ecuación (2) en condiciones de estado estable ($\frac{d\omega}{dt} = 0$):

$$\beta = \frac{K_m i_a - \tau_c}{\omega} \quad (4)$$

donde el par de carga (τ_c) está dado por:

$$\tau_c = \frac{P_{salida}}{\omega} \quad (5)$$

El valor β se determina por (4) utilizando los datos obtenidos de τ_c y los datos nominales del motor, mostrados en la **Tabla 1**.

Cálculo de la constante de inercia (J).

La constante de inercia representa la oposición al cambio de movimiento de rotor (de reposo a movimiento y viceversa). Para calcular su valor se requiere la masa (m) y el radio del rotor (r), tal como se expresa en la ecuación (6)

$$J = \frac{1}{2}(mr^2) \quad (6)$$

Validación de los parámetros del motor de CD.

Para verificar que los parámetros calculados corresponden a los valores reales, se realiza la comparación de resultados de simulaciones con respecto a mediciones de pruebas experimentales de laboratorio.

El proceso de simulación se lleva a cabo por medio de la herramienta Simulink de Matlab® tal como se muestra en el esquema de la **Figura 7**, donde se resuelve el modelo matemático representado por las ecuaciones (1) y (2) utilizando los parámetros determinados.

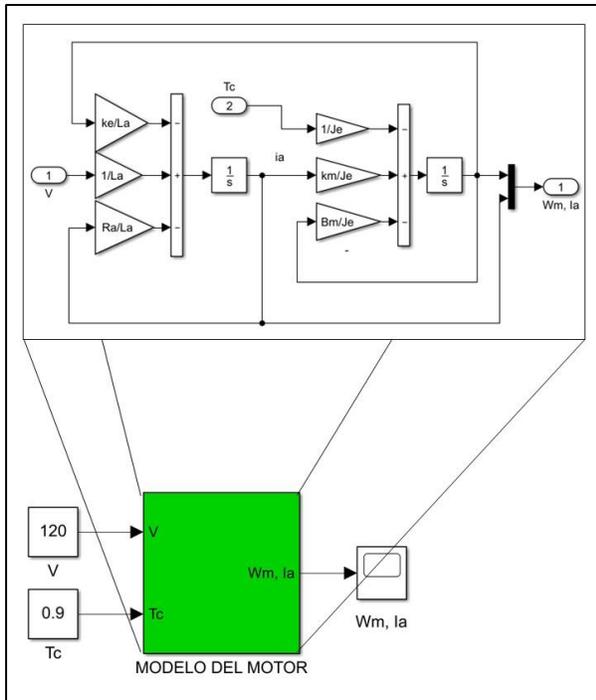


Figura 7. Simulación en Simulink, subsistema de motor de CD.

Por otro lado, las pruebas experimentales de laboratorio se realizan utilizando una fuente de voltaje de CD, módulo de motor de CD, multímetros, osciloscopio, módulo de electrodinamómetro (que emula el par mecánico aplicado), un dispositivo electrónico (circuito de control) para sincronización de señales.

RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de las pruebas realizadas al motor de CD, con las cuales se determinan sus parámetros. A partir de las mediciones de la prueba de resistencia de armadura se obtiene la gráfica de la

Figura 8. La resistencia de armadura corresponde a la pendiente de dicha ecuación, dando como resultado una $R_a = 8.79 \Omega$.

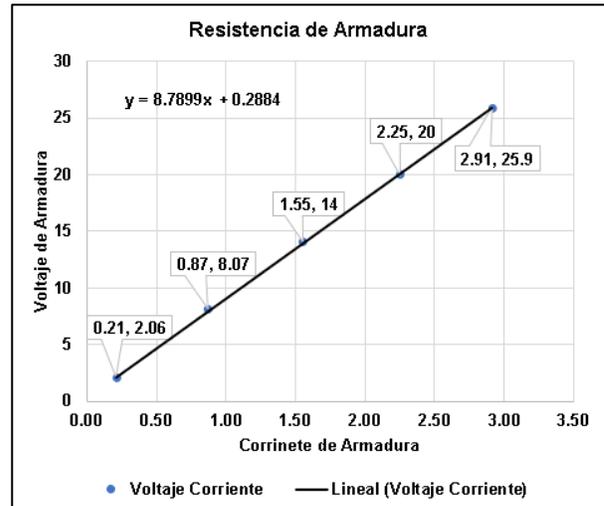


Figura 8. Ajuste de curva de resistencia de campo.

Las mediciones obtenidas de la prueba de resistencia de campo se presentan en la **Figura 9**. Así, el valor de la resistencia de campo (R_f) es 279.33Ω .

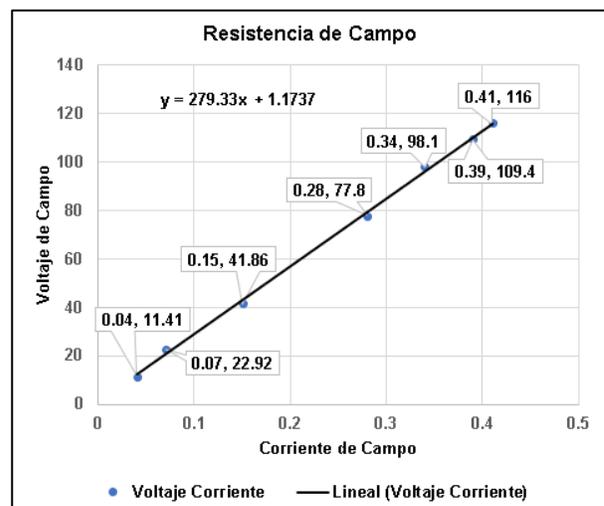


Figura 9. Ajuste de curva de resistencia de campo.

La inductancia de armadura y de campo medidos con el LCR meter son 0.050207 H y 3.907 H, respectivamente.

Los resultados de la prueba de las constantes de la fuerza contraelectromotriz y del torque electromecánico se presentan en la **Tabla 2**. Finalmente, las constantes K_e y K_m se obtiene del promedio de los valores calculados de todas las mediciones, resultando $0.535 \text{ rad}/(V \cdot \text{seg})$ y $0.535 \text{ N} \cdot \text{m}/A$, respectivamente.

Tabla 2. Cálculo de constante de fuerza contraelectromotriz y torque electromagnético.

v_a	i_a	ω	K_e
15.1	0.68	16.55	0.560
18.6	0.721	23.14	0.537
21.4	0.724	28.69	0.529
24.4	0.712	34.66	0.528
28.1	0.728	41.05	0.532
30.4	0.73	45.55	0.530
33.8	0.741	51.52	0.533
34.1	0.741	52.36	0.530
Promedio:			0.535

El coeficiente de fricción viscosa β se determina por medio de la ecuación (4):

$$\beta = \left| \frac{0.535 * 0.236 - 0.928}{188.5} \right|$$

$$= 0.00425 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{seg}$$

donde el par de carga nominal se dado por:

$$\tau_c = \frac{175 \text{ w}}{188.5 \text{ rad/s}} = 0.928 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Los valores medidos de la masa y el radio del rotor son 2.835 Kg y 0.047 m, respectivamente. Utilizando la ecuación (6) se obtiene la constante de inercia, $J = 0.003131 \text{ Kg m}^2$.

Finalmente, la **Tabla 3** presenta en forma resumida los parámetros del motor de CD determinados por las pruebas realizadas.

Tabla 3. Datos Reales de los parámetros de un Motor de CD

Parámetro	Valor
R_a	8.79 Ω
L_a	0.050207 H
R_f	275.4 Ω
L_f	3.907 H
K_e	0.535 $\text{rad}/(V \cdot \text{seg})$
K_m	0.535 $\text{N} \cdot \text{m}/A$
β	0.00442934 $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{seg}$
J	0.00313126 $\text{Kg} \cdot \text{m}^2$

Resultados comparativos del funcionamiento del motor de CD. Para que sea posible realizar una comparación entre los resultados de las pruebas de simulación y las pruebas experimentales, se debe de garantizar que el voltaje (v_a) y el par mecánico (τ_c) aplicado en las pruebas experimentales sean los mismos

que se utilizan en las pruebas de simulación.

Caso de estudio en vacío. Para esta prueba se considera un voltaje de alimentación de 34 V y un par mecánico de 0.384 N·m. El comportamiento dinámico de la velocidad y la corriente de armadura se muestran en la **Figura 10**.

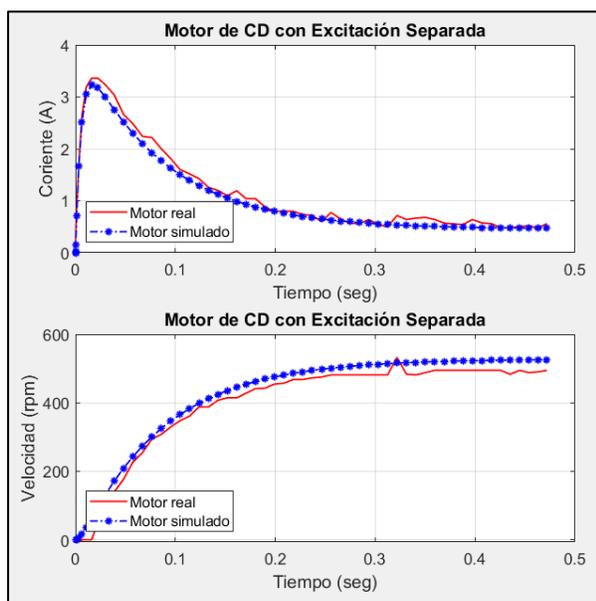


Figura 10. Comparación del comportamiento dinámico del motor real y simulado.

Caso de estudio curva par-velocidad. Para esta prueba se considera un voltaje de alimentación de 124 V y un par mecánico variable desde 0.396 a 0.9 N·m. La curva par-velocidad obtenida para las pruebas experimentales y de simulación se muestra en la **Figura 11**.

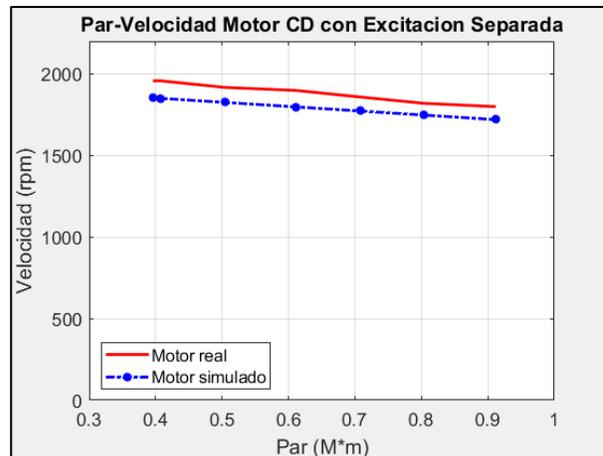


Figura 11. Par-velocidad motor CD con excitación separada.

DISCUSIÓN

El comportamiento de la velocidad real del motor es muy cercano a la velocidad obtenida mediante simulación computacional, con un error de precisión promedio no mayor al 2%. En ese mismo sentido, se observa que la corriente de armadura de simulación se mantiene muy cercana al valor real del motor. Adicionalmente, la curva característica de par-velocidad obtenida por simulación muestra un error relativo menor al 5% en comparación con la curva característica real. Por lo cual, los parámetros obtenidos con la metodología presentada proporcionan la precisión necesaria para emular el comportamiento de un motor de CD y es útil para aplicaciones en diseño de sistemas de control, diagnóstico de fallas de motores y otros.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una metodología para determinar los parámetros mecánicos y eléctricos de un motor de CD utilizando instrumentación convencional y de bajo costo en laboratorios de máquinas eléctricas. Los parámetros obtenidos con este procedimiento fueron validados a través de pruebas de simulaciones computacionales y comparadas con pruebas experimentales de laboratorio en tiempo real. Los resultados de las pruebas muestran que los parámetros obtenidos son adecuados para aplicaciones donde se requiera utilizar el modelo matemático del motor de CD tales como sistemas de regulación de velocidad, control de par mecánico, control de posición, entre otros.

REFERENCIAS

- [1] Lázaro I., Roman D., Anzures J., Pitalúa N (2009). Técnica de Estimación Paramétrica Aplicada a un Motor de CD Vía Series Walsh. Ingeniería, 13-2, 23-32.
- [2] Wu W. (2012). DC Motor Parameter Identification Using Speed Step Responses. Modelling and Simulation in Engineering, Hindawi Corporación Editorial, 2012, 1687-5591.
- [3] Lazarte J (2017). Parámetros estimados en motor DC mediante el método de minimización del error de predicción, Investigación aplicada e innovación TECSUP,11, 18-24.
- [4] Krause P, Wasynczuk O, Sudhoff S, et al. (2013). DC Machines and Drives. In: Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, IEEE Press Series on Power Engineering, Edition 3. 337-387. Nueva Jersey.
- [5] Chapman S. (2012). Motores y Generadores de Corriente Directa, En: Maquinas Eléctricas, McGRAW-HILL, Edición 5. 346-348. México.