



DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v6i5.1600>

Ciencias técnicas y aplicada

Artículo de revisión

*Prototipo de motor eléctrico de corriente continua controlado por campo*

*Field-controlled DC electric motor prototype*

*Protótipo de motor eléctrico DC controlado em campo*

Adrián Paolo Arteaga-Montesdeoca <sup>I</sup>

[paolo\\_arteaga@hotmail.com](mailto:paolo_arteaga@hotmail.com)

<https://orcid.org/0000-0001-9720-2204>

Jimmy Andrés Arteaga-Montesdeoca <sup>II</sup>

[jartmont89@outlook.com](mailto:jartmont89@outlook.com)

<https://orcid.org/0000-0003-4541-1930>

**Correspondencia:** [paolo\\_arteaga@hotmail.com](mailto:paolo_arteaga@hotmail.com)

**\*Recibido:** 9 de noviembre de 2020 **\*Aceptado:** 16 de noviembre de 2020 **\* Publicado:** 16 de diciembre de 2020

- I. Ingeniero Eléctrico, Gerente de la Empresa Prefabricados de Hormigón Jarvelec & Prefa S.A, Estudiante Investigador de posgrado de la Maestría de Investigación en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia en la Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.
- II. Ingeniero Eléctrico, Estudiante de posgrado de la Maestría de Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia en la Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.

## Resumen

El artículo que se presenta pretende exponer tópicos importantes sobre las máquinas de corriente continua (CC), el motor de excitación derivación o shunt, el generador de excitación separada y los software de simulación como el Simulink, Xcos y Modélica, y tiene como propósito conocer las diferentes conceptualizaciones y su significado sobre la temática de prototipo de motores eléctricos de CC. Asimismo, comprende una revisión documental o desk research y de contenido de un ensayo previamente realizado por Córdova y Plaza en el año 2016, sobre el "Modelamiento y simulación de un motor/generador eléctrico de corriente continua controlado por campo/armadura y con carga variable", que establece el estudio con dos casos particulares de un motor derivación (shunt) y un generador con excitación separada controlados por armadura.

**Palabras claves:** Prototipo; motor; generador; simulación; software.

## Abstract

The article that is presented aims to expose important topics about direct current (DC) machines, the shunt or shunt excitation motor, the separate excitation generator and simulation software such as Simulink, Xcos and Modelica, and its purpose is to know the different conceptualizations and their meaning on the subject of prototype of DC electric motors. It also includes a documentary or desk research and content review of an essay previously carried out by Córdova and Plaza in 2016, on the "Modeling and simulation of a field / armature controlled direct current electric motor / generator with variable load ", which establishes the study with two particular cases of a shunt motor and a generator with separate excitation controlled by armature.

**Keywords:** Prototype; engine; generator; simulation; software.

## Resumo

O artigo que se apresenta tem como objetivo expor tópicos importantes sobre máquinas de corrente contínua (DC), o motor de excitação shunt ou shunt, o gerador de excitação separado e softwares de simulação como Simulink, Xcos e Modelica, e seu objetivo é conhecer as diferentes conceituações e seus significados em relação ao protótipo de motores elétricos DC. Inclui também uma revisão documental ou documental e conteúdo de um ensaio anteriormente realizado por Córdova e Plaza em 2016, sobre o tema "Modelagem e simulação de um motor / gerador elétrico

de corriente continua controlado por campo / armadura com carga variável", que estabelece o estudo com dois casos particulares de um motor shunt e de um gerador com excitação separada controlada por armadura.

**Palavras-chave:** Protótipo; motor; gerador; simulação; software.

## Introducción

En los estudios y en la carrera de la ingeniería, en sus diversas ramas, los discentes y profesionales deben enfrentarse a diferentes retos, entre los cuales están los diseños de prototipos de diseños de proyectos a los cuales esté orientado un área técnica. En cuanto a la ingeniería eléctrica, se basa en prototipos hacia el diseño de máquinas síncronas, asíncronas, motores, generadores eléctricos, donde existen elementos y características para determinar su correcto funcionamiento y decidir si es el adecuado para las aplicaciones requeridas.

Ahora bien, en la actualidad con el uso de la tecnología, los diseños de prototipos de motores eléctricos se han simplificado con la ayuda de los softwares, los cuales simulan y predicen su comportamiento en el mundo real (Báez, Jiménez & Gutiérrez, 2018), en el que se debe aplicar los fundamentos teóricos vistos en los diferentes cursos y llevarlos a la práctica a través de una herramienta de modelación y/o simulación.

Por lo cual, se requiere que para conocer si un prototipo de motor y/o generador eléctrico está diseñado de manera correcta para sus fines de corriente y voltaje, así como conocer la reacción que puede tener el inducido y la conmutación que son los elementos eléctricos que pueden producir problemas, es necesario calcularlos a través de ecuaciones de manera ideal y bajo simulaciones de software que trabajan bajo el esquema de modelados matemáticos, para determinar la dinámica que tenga el motor/generador, es decir, su comportamiento en una versión sistematizada de la realidad, a partir de lo cual se puede implementar los debidos controles ante las variaciones que pueda presentar.

Hoy día, hay una gran cantidad de equipos, motores y/o generadores que trabajan con corriente alterna, debido a la simplicidad de la energía en su manejo y por su impacto en los bajos costos. Por tanto, el uso de la corriente continua es utilizado para otros fines electromecánicos y en sistemas de generación y distribución en áreas donde resulta propicia este tipo de corriente y en donde su aplicación se pueda controlar de manera rápida y concreta, por lo cual, un motor eléctrico de

corriente continua es esencialmente una máquina que convierte energía eléctrica en movimiento o trabajo mecánico, a través de medios electromagnéticos (Patiño, 2018).

Por lo cual, en este ensayo se presentan las características de acuerdo a los fundamentos de varios autores y respecto a la revisión de una investigación sobre la investigación de Córdova y Plaza en el año 2016 sobre el Modelamiento y simulación de un motor/generador eléctrico de corriente continua controlado por campo/armadura y con carga variable, el cual es el antecedente principal de la temática abordada y que presenta vacíos teóricos o documentales, los cuales hay que reforzar para su comprensión y en el que se toman dos casos particulares de un motor derivación (shunt) y un generador con excitación separada controlados por armadura.

En este sentido, los motores eléctricos de corriente continua o corriente directa con los casos que se especificaron en el párrafo anterior, es el tema fundamental que se desarrolla de manera amplia en los siguientes párrafos, a saber:

***Máquina de corriente continua o directa. Conceptualización y características fundamentales:***

Para Aller (2015) es una máquina que "está constituida básicamente por un estator, un rotor y un colector acoplado sólidamente al rotor" (p.7). En donde el autor refiere que el colector permite conectar los conductores de la armadura a la fuente de tensión continua, mediante un juego de carbones o escobillas solidarios con el estator de la máquina.

De igual manera, en la investigación de Córdova y Plaza (2016), señalan que este tipo de máquinas: "*se componen de dos partes principales llamadas estator y rotor, el estator es la parte estática de la máquina en ella podemos encontrar las bobinas inductoras generadoras del campo magnético a través del entrehierro, por otra parte, el rotor es la parte móvil de la máquina en ella se encuentra el devanado que generara una fuerza electromotriz (fem) inducida motivada por el movimiento del rotor y el campo generado en el interior de la máquina*" (p.2).

Por lo cual, el principio de operación de este tipo de máquinas se basa en la inyección de corriente continua, en el circuito rotórico y en el estatórico.

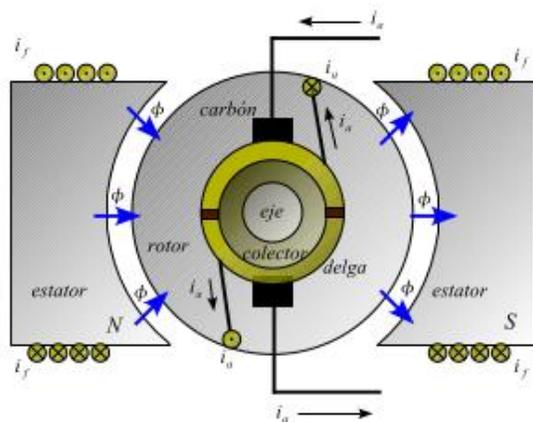
En este sentido, existe una clasificación de este tipo de máquinas, el cual se fundamenta en el mecanismo de excitación, que puede ser independiente o auto excitado (las cuales pueden ser en serie, derivación y compuesta).

De la misma manera, también está expuesta a las pérdidas como otro elemento a considerar, por los desgastes en escobillas, el cobre, por fricción y en el núcleo.

Por tanto, es importante darse a la tarea de seleccionar el adecuado material del núcleo del estator óptimo, lo cual requiere también de tomar en consideración la optimización multicriterio, tal como lo refiere Ismagilov et al. (2018), hay que tomar como criterio de selección en el uso de los parámetros de las máquinas eléctricas "de masa y tamaño, la densidad de flujo magnético, la eficiencia, la capacidad de fabricación y el costo del núcleo del estator" (p.3), debido a que cada uno de estos criterios se puede representar como una función de la densidad de flujo magnético en la parte posterior y los dientes del estator, donde es posible formular una función matemática de la selección del material del núcleo magnético del estator.

Seguidamente, en la figura 1 que se presenta a continuación, se puede observar un diagrama y un prototipo para fines demostrativos que incluye Aller (2015) en su material de información sobre la Modelación y control de máquinas eléctricas.

**Figura 1:** Diagrama y prototipo.



a. Diagrama esquemático



b. Modelo Constructivo

**Nota:** Los puntos a y b muestran al detalle el prototipo de máquina de corriente continua.

**Fuente:** Aller (2015).

## Metodología, Materiales y Métodos

La metodología a implementar en este artículo es de revisión de un documento o desk research, cuyos autores Córdova, Diego y Plaza, Douglas en el año 2016, plantearon realizar un "Modelamiento y simulación de un motor/generador eléctrico de corriente continua controlado por

campo/armadura y con carga variable", en el que fundamentan el trabajo en dos casos particulares de un motor shunt y un generador con excitación separada controlados por armadura, en el cual se describe a continuación los procesos indagatorios para obtener a posterior resultados, los cuales apuntan a: motor de excitación derivación o shunt, generador de excitación separada y los Software aplicados Simulink, Xcos y Modélica.

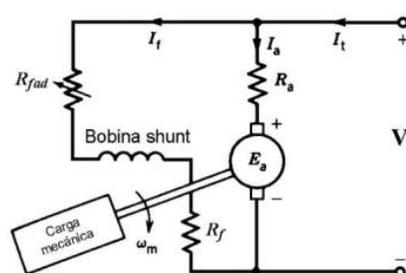
**Motor de excitación derivación o shunt:** De acuerdo a lo que expresa Córdova y Plaza (2016), en “un motor las características más importantes son el par de salida, la corriente de armadura y su velocidad, por ello es interesante conocer cómo se comporta la velocidad del motor derivación para cambios del par de salida” (p.2).

En este tipo de excitación los motores están en derivación respecto del circuito de armadura, por lo que la corriente que circula a través del campo es pequeña debido a que su resistencia es alta para evitar que el circuito de armadura se sobrecargue, debido a que soporta la corriente de carga y la de excitación.

Por lo tanto, al incrementar la carga en el motor, el par de la carga excede al par de salida lo que incurre en una disminución de la velocidad, que a su vez disminuye la reacción del inducido ( $E_a$ ), en el que se incrementa la corriente a través de la armadura ( $I_a$ ), por lo cual mientras aumenta la corriente en el inducido también lo hace el par del motor, y el par del motor se iguala al de la carga en menor velocidad (Córdova & Plaza, 2016).

Seguidamente se muestra en la figura 2, el modelo de motor de derivación (shunt).

Figura 2: Motor derivación.



a. Motor derivación (shunt)

$$E_a = K\omega$$

$$V_{in} - E_a = R_a i_a + L \frac{di_a}{dt}$$

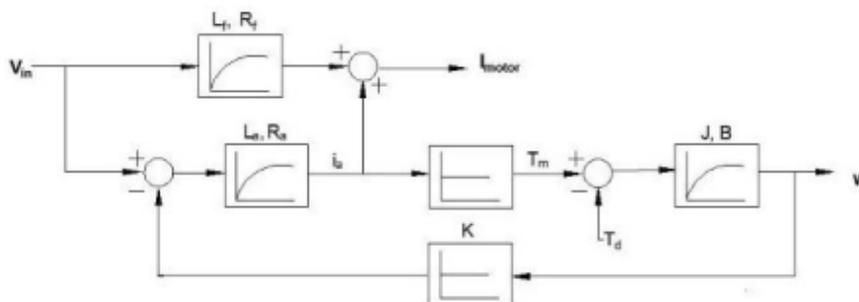
$$i_{motor} = i_f + i_a$$

$$T_m = K i_a$$

$$T_m - T_d = J_L \frac{d\omega}{dt} + B\omega$$

b. Las ecuaciones de funcionamiento del motor derivación (shunt)

Prototipo de motor eléctrico de corriente continua controlado por campo



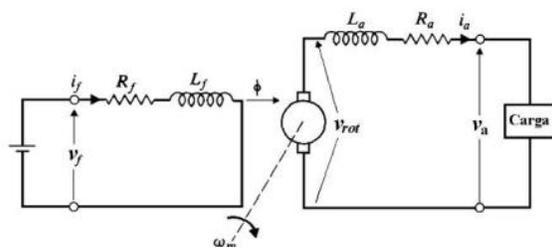
c. Diagrama funcional del motor derivación (shunt)

**Nota:** Los puntos a, b y c muestran el motor derivación (shunt).

**Fuente:** Córdova y Plaza (2016)

**Generador de excitación separada:** Una máquina de corriente continua (CC) de excitación separada tiene su circuito inductor (campo) alimentado desde una fuente independiente al circuito del inducido (armadura), (Córdova & Plaza, 2016).

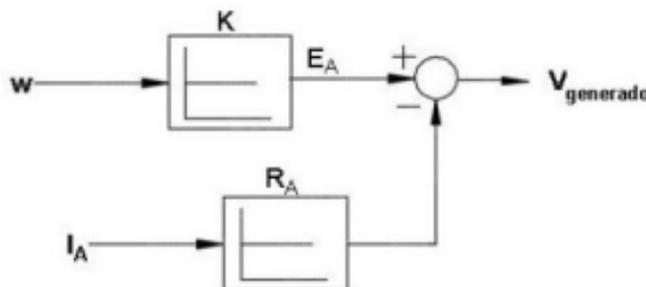
**Figura 3:** Generador.



$$V_{generado} = E_a - I_a R_a$$

a. Generador de excitación separada

b. Ecuaciones de funcionamiento del generador



c. Diagrama funcional del generador

**Nota:** Los puntos a, b y c, muestran el generador de excitación separada.

**Fuente:** Córdova y Plaza (2016)

**Software Simulink, Xcos y Modelica:** Simulink es un entorno de programación de alto nivel, este software es utilizado por ingenieros y científicos para "el modelado y simulación multidominio, porque se puede volver a utilizar modelos a través de entornos para simular la forma en todas las partes del sistema de trabajo en conjunto", en el que se pueden construir y simular sistemas híbridos y aplicaciones específicas de la industria utilizando bloques prediseñados (grupo MathWorks, 2020).

En cuanto al software Xcos, es un editor gráfico eficiente para modelar sistemas dinámicos híbridos. Se pueden diseñar, cargar, guardar, compilar y simular sistemas discretos y continuos (Scilab, 2020). Asimismo, los bloques disponibles incluyen procesamiento de señales, operaciones eléctricas, termohidráulicas, matemáticas y muchas otras opciones y otros que puede personalizar el usuario, donde aporta y agrega fácilmente información al marco, donde también proporciona funcionalidades para el modelado de sistemas mecánicos, circuitos hidráulicos, sistemas de control, entre otros.

Modelica es un lenguaje orientado a objetos desarrollado para describir de manera sencilla modelos de sistemas dinámicos eventualmente muy complejos, donde las herramientas de Modelica facilitan considerablemente el modelo físico de construcción, analizando automáticamente la estructura general de los modelos de una manera mucho más fácil de usar. los autores refieren que el flujo de datos de bajo nivel se realiza automáticamente en uno de manera satisfactoria, que libera a los usuarios de un trabajo arduo y engorroso (Chancelier et al., 2019).

## **Análisis y Discusión de los resultados**

El diseño mostrado por Córdova y Plaza (2016), mostraron los siguientes resultados:

1. En relación a la obtención de los parámetros de la máquina de CC, los autores realizaron un diseño experimental, en la cual denominaron con el número de serie No 14237, que se muestra en la figura 4 con los datos respectivos.

**Figura 4:** Máquina de CC.



a. Especificaciones del prototipo de la máquina



b. Prototipo de la máquina

Tensión de alimentación	220 V
Motor derivación	1700 rpm – 1kW
Motor serie	1400 rpm – 1kW
Generador	1700 rpm – 1kW

c. Datos del prototipo de la máquina

**Nota:** Los puntos a, b y c muestran a la máquina de CC, N°14327.

**Fuente:** Córdova y Plaza (2016)

2. Posteriormente los autores muestran un resumen (figura 5) de los parámetros obtenidos de la máquina de corriente continua, en el que con esos datos y la teoría presentada anteriormente sobre los diagramas del motor de excitación derivación o shunt (figura 2) y generador de excitación separada (figura 3), prepararon la simulación con los softwares Simulink, Xcos y Modelica.

**Figura 5:** Parámetros para la simulación.

Resistencia de campo	$R_f$	340 $\Omega$
Resistencia de armadura	$R_a$	4 $\Omega$
Inductancia de campo	$L_f$	1.97 H
Inductancia de armadura	$L_a$	0.01 H
Constante de fuerza contraelectromotriz	$K'$	1.224 V.s/rad
Coefficiente de fricción viscosa	$B$	0.00344 Nms/ra d
Inercia del motor	$J_m$	0.00274 $\text{kgm}^2$

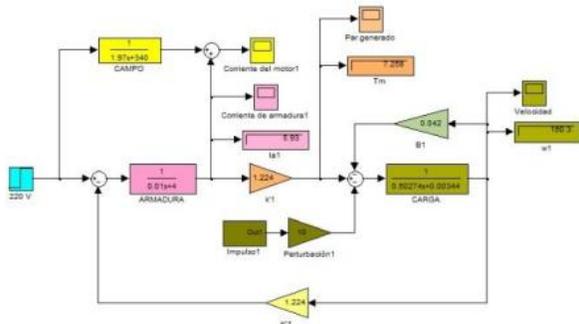
**Nota:** Parámetros obtenidos para la simulación de la máquina de CC.

**Fuente:** Córdova y Plaza (2016)

Prototipo de motor eléctrico de corriente continua controlado por campo

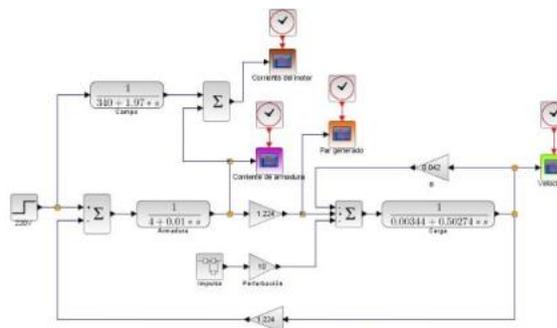
3. Al aplicar los datos respectivos en la simulación, se muestra para el motor de derivación (figura 6, 7 y 8), los siguientes resultados:

**Figura 6:** Motor simulación 1.



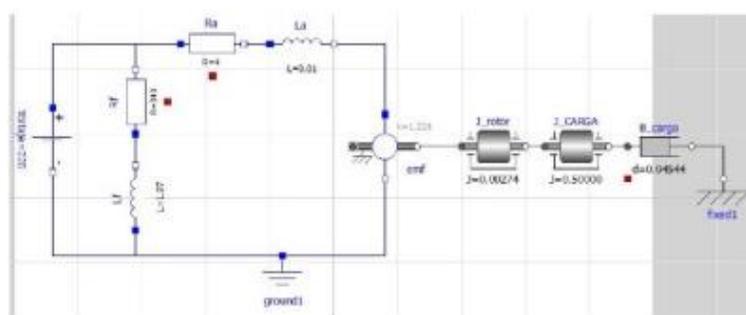
**Nota:** Motor derivación, entorno Simulink.  
**Fuente:** Córdova y Plaza (2016)

**Figura 7:** Motor simulación 2.



**Nota:** Motor derivación, entorno Xcos.  
**Fuente:** Córdova y Plaza (2016)

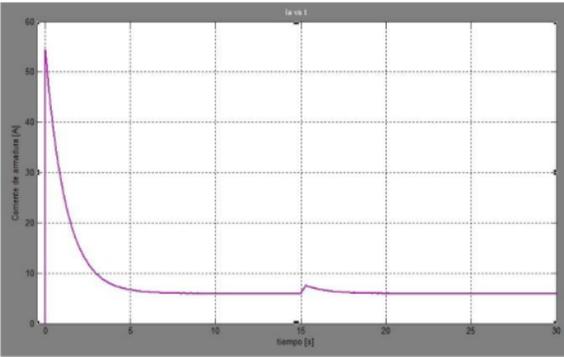
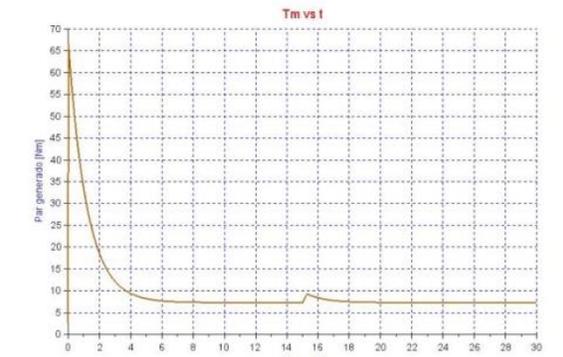
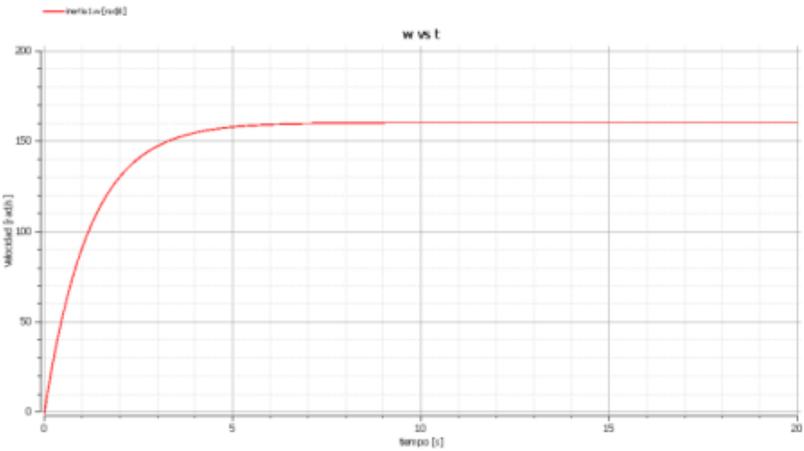
**Figura 8:** Motor simulación 3.



**Nota:** Motor derivación, entorno Modelica.  
**Fuente:** Córdova y Plaza (2016)

4. Luego presentan los resultados obtenidos de la corriente de armadura, par generado y velocidad del motor (figuras 9, 10 y 11).

Prototipo de motor eléctrico de corriente continua controlado por campo

<p align="center"><b>Figura 9: Resultados 1.</b></p> 	<p align="center"><b>Figura 10: Resultados 2.</b></p> 
<p><b>Nota:</b> Corriente de armadura, Simulink.  <b>Fuente:</b> Córdova y Plaza (2016)</p>	<p><b>Nota:</b> Par generado, Simulink.  <b>Fuente:</b> Córdova y Plaza (2016)</p>
<p align="center"><b>Figura 11: Resultados 3.</b></p>	
	
<p align="center"><b>Nota:</b> Velocidad desarrollada, Modelica.  <b>Fuente:</b> Córdova y Plaza (2016)</p>	

5. En la figura 12 se presenta una tabla que muestra la precisión de los resultados que obtuvieron los autores con la simulación en los softwares libres Xcos, Modelica, los cuales contrastaron con Simulink.

**Figura 12:** Tabla comparativa.

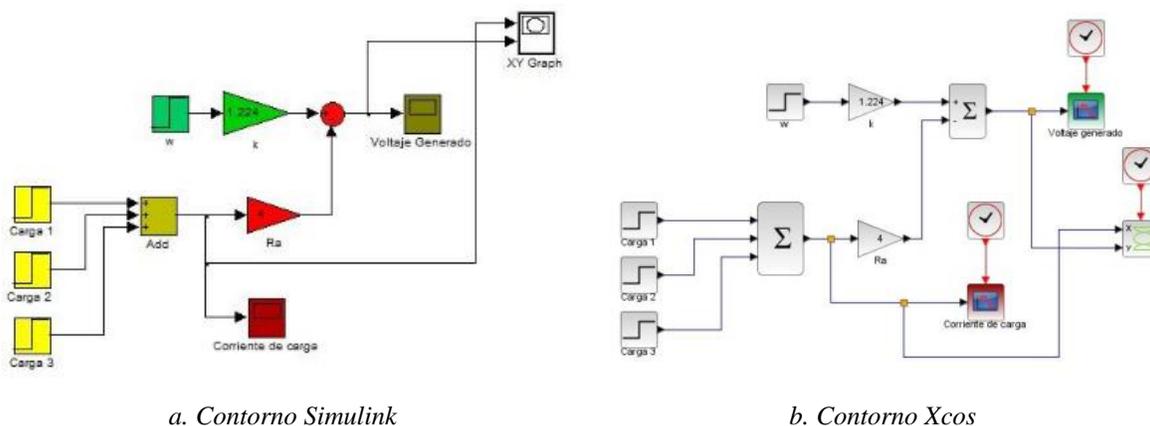
Medición	$\epsilon_{Xcos}$	$\epsilon_{modelica}$
Corriente pico de armadura	0.13 %	0.04 %
Corriente estable de armadura	0.50 %	0.50 %
Velocidad desarrollada	0%	0 %
Par pico generado	0.13 %	0.03 %
Par estable generado	0.52%	0.52 %

**Nota:** Tabla de valores comparativos a Simulink.

**Fuente:** Córdova y Plaza (2016)

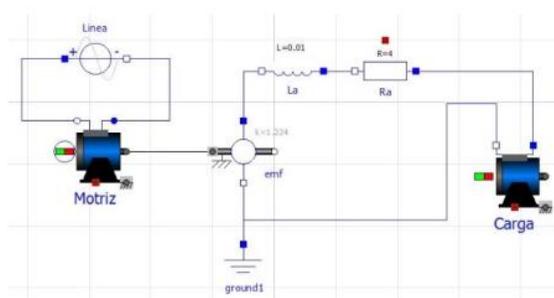
6. En la figura 13 se muestra el generador de excitación separada, con los diagramas de bloques de la máquina de CC funcionando como generador, bajo las aplicaciones de Simulink, Xcos y Modélica.

**Figura 13:** Generador.



a. Contorno Simulink

b. Contorno Xcos



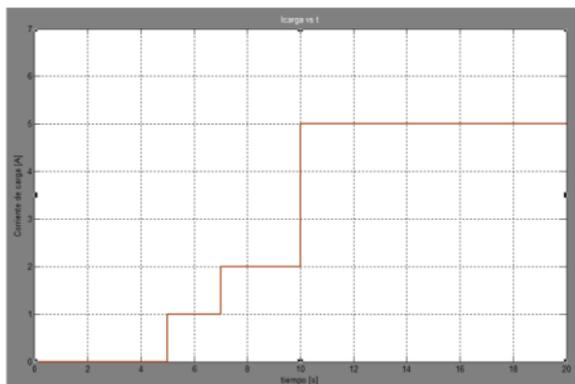
c. Contorno Modelica

**Nota:** Los puntos a, b y c muestran al generador de CC.

**Fuente:** Córdova y Plaza (2016)

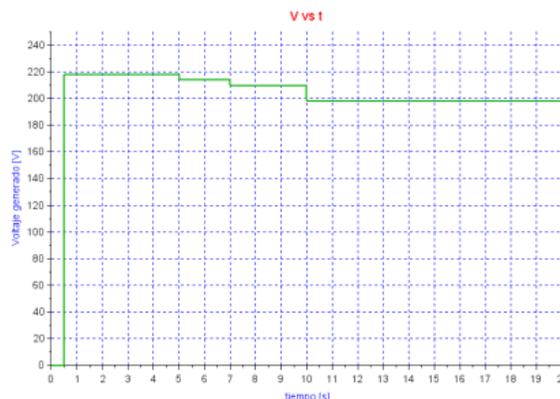
7. El funcionamiento del generador se describe en las figuras 14 y 15, donde se observa la caída del voltaje debido a las pérdidas de cobre producto de un incremento en la corriente demandada por la carga.

**Figura 14:** Corriente de la carga.



**Nota:** Corriente de la carga, Simulink.  
**Fuente:** Córdova y Plaza (2016)

**Figura 15:** Voltaje generado.



**Nota:** Voltaje generado por la máquina, Xcos.  
**Fuente:** Córdova y Plaza (2016)

## Conclusiones

El modelado simulación a través de software son métodos experimentales, los cuales se fundamentan en un conjunto de técnicas y herramientas donde se analizan las teorías y la aplicación práctica a través de la virtualidad que es lo más cercano a la realidad y que disminuye los procesos de evaluación y diseños en tiempo y costo.

En el trabajo de revisión, se establece que los autores Córdova y Plaza en el año 2016, utilizaron tres softwares para la simulación de un prototipo de motor, los cuales fueron: Simulink, Xcos y Modélica, el cual, el primero es un software comercial y los otros dos son softwares libres.

En cuanto a la simulación, en todos los softwares utilizaron una frecuencia de muestreo ajustada de 10 kHz y consideraron mayor confiabilidad al software comercial Simulink y observaron errores comparativos respecto a los otros dos menores al 1%, es decir, Xcos (0-0.52%) y Modelica (0-0.78%).

De la misma forma, observaron que Xcos tiene una ventaja respecto a Simulink, en cuanto al ajuste de los tiempos de muestreo para bloques ya que el software comercial trabaja con configuración de un tiempo de muestreo general.

El prototipo de motor se puede simular ampliamente para otros estudios en otros softwares, y analizar los resultados respecto a Simulink o para otro que tomen de referencia.

## Referencias

1. Actuators & Sensors in Mechatronics: Brushed DC Motors. (2020, 11 de agosto). Direct-Current Motors. <https://url2.cl/C35r4>
2. Aller, J. (2015). Modelación y Control de Máquinas Eléctricas. Parte II. [http://prof.usb.ve/jaller/CursoMaquinasRiobamba\\_beamer\\_Parte2.pdf](http://prof.usb.ve/jaller/CursoMaquinasRiobamba_beamer_Parte2.pdf)
3. Báez, J., Jiménez, R. y Gutierrez, D. (2018). MATLAB/SIMULINK: Modelos para simular mediciones eléctricas en circuitos r, rl y rlc monofásicos. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6759655>
4. Benhaddadi, M., Olivier, G., Ibtouen, R., Yelle, J. & Tremblay, J-F. (2010). Premium Efficiency Motors. <https://url2.cl/aBPBt>
5. Boldea, I. (2017). Electric Generators and Motors: an overview. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7911104>
6. Córdova, D. y Plaza, D. (2016). Modelamiento y simulación de un motor/generador eléctrico de corriente continua controlado por campo/armadura y con carga variable. <https://url2.cl/YjvLs>
7. Chancelier, J., Furic, S. & Weis, P. (2019). Translating Simulink Models to Modelica using the Nsp Platform. [https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01948681/file/nsp\\_slk2mo.pdf](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01948681/file/nsp_slk2mo.pdf)
8. EC&M Web. (2020, 11 de agosto). Direct Current Motor Basics. <https://www.ecmweb.com/archive/article/20893400/direct-current-motor-basics>
9. Electronics Projects Focus. (2020, 12 de agosto). DC MOTOR – Basics, Types & Application. <https://www.elprocus.com/dc-motor-basics-types-application/>
10. Ho, Tze-Yee (2018). The Design of Motor Drive for Brushless DC Motor. <https://url2.cl/DNeaE>
11. Ho, Tze-Yee (2020, 10 de agosto). The Design of Motor Drive for Brushless DC Motor. <https://url2.cl/2a4vl>
12. Ismagilov, F., Vavilov, V. & Ayguzina, V. (2018). Materials Used in High-Speed Electrical Machines. <https://url2.cl/ts65T>

13. Leeson Electric Corporation (1997). Practical Motor Basics. <https://url2.cl/Md2nQ>
14. MachineDesign (2020, 10 de agosto). MOTORS & DRIVES. DC Motors. <https://www.machinedesign.com/motors-drives/article/21812901/dc-motors>
15. Maxon Group (2019). Design Guide On DC Motors. <https://wtwh-marketing.s3.amazonaws.com/designguides/DCMotors-DesignGuide.pdf>
16. OpenModelica-OM (2020, 12 de agosto). Introduction OPENMODELICA. <https://openmodelica.org/>
17. Patiño, J. (2018). Curso: Máquinas Eléctricas (Taller V) Tema: N° 1 Motores de Corriente Continua. <https://url2.cl/DJaAG>
18. Patrascoiu, N. (2018). Designing a DC Motor Simulator Based on Virtual Instrumentation. <https://url2.cl/4YJ5j>
19. Sciencedirect (2020, 11 de agosto). Direct Current Motor. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/direct-current-motor>
20. Scilab. (2020, 12 de agosto). Xcos. Recuperado de <https://www.scilab.org/software/xcos>
21. Windings (2020, 10 de agosto). Basic motor design tutorial. <https://www.windings.com/technical-reference/basic-motor-design-tutorial/>

©2020 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).