

# **CONMUTACIÓN DE UNA MÁQUINA BRUSHLESS DE CORRIENTE DIRECTA MOTOR / GENERADOR ELÉCTRICO**

## *COMMUTATION OF A CURRENT DIRECT BRUSHLESS MACHINE MOTOR / ELECTRIC GENERATOR*

**David Marcos Andrade**

Universidad Politécnica de Tulancingo, México

*david.marcosand@gmail.com*

**Iván de Jesús Rivas Cambero**

Universidad Politécnica de Tulancingo, México

*ivan.rivas@upt.edu.mx*

**Juan Eduardo Esquivel Cruz**

Universidad Politécnica de Tulancingo, México

*laloesquivelcruz@gmail.com*

**José Humberto Arroyo Núñez**

Universidad Politécnica de Tulancingo, México

*Humberto.arroyo@upt.edu.mx*

**Recepción:** 1/noviembre/2021

**Aceptación:** 21/diciembre/2021

### **Resumen**

La problemática inicial surge de algunos sistemas tales como vehículos eléctricos, donde los motores brushless son utilizados para proveer la fuerza motriz y requieren de baterías recargables al ser móviles, lo cual necesita de centros de carga, esto significa que el frenado regenerativo de dicha máquina es una buena propuesta para utilizarse en aplicaciones de recarga.

El objetivo principal de este trabajo es aprovechar las bondades que presentan las máquinas sin escobillas, se construye un controlador electrónico de velocidad (ESC, por sus siglas en inglés) para su operación como motor eléctrico, posteriormente se realizan pruebas de la máquina como generador eléctrico.

En ambas propuestas los resultados son favorables tanto en la construcción del ESC basado en transistores de efecto de campo (MOSFET) donde se utiliza la técnica de modulación por ancho de pulso para el control de velocidad, así como en las pruebas de generación de energía eléctrica.

Las pruebas son comparadas con simulaciones del dispositivo utilizado e integradas físicamente mediante electrónica de potencia que permite la conmutación de la máquina como motor y como generador eléctrico.

**Palabras Clave:** Efecto Hall, ESC, generador eléctrico, máquina eléctrica, motor sin escobillas.

## **Abstract**

*The initial problem arises from some systems such as electric vehicles, where brushless motors are used to provide the motive power and require rechargeable batteries due to their mobility, which requires load centers, this means that the regenerative braking of the machine is a good proposition to work in recharging applications.*

*The main objective of this work is to take advantage of the benefits of brushless machines, an Electronic Speed Controller (ESC) is built for its operation as an electric motor, then, tests of the machine are carried out as an electric generator.*

*In both proposals the results are favorable both in the construction of the ESC based on field effect transistors (MOSFET) where the pulse width modulation technique is used for speed control, as well as in the electrical power generation tests.*

*The tests are compared with simulations of the device used and physically integrated by means of power electronics that allow the switching of the machine as a motor and as an electric generator.*

**Keywords:** Brushless motor, electric generator, electric machine, ESC, Hall effect.

## **1. Introducción**

La disponibilidad de los imanes permanentes modernos con considerable densidad de energía llevó al desarrollo de máquinas con campo de excitación de Imanes Permanentes (PM, por sus siglas en inglés) en los años 50. Con la llegada de los transistores de potencia de alta conmutación y SCR's a finales de 1950, el reemplazamiento de conmutadores mecánicos por conmutadores electrónicos en la forma de un inversor había sido logrado. Estos 2 logros dieron lugar al desarrollo de máquinas síncronas y máquinas de CD sin escobillas [Krishnan, 2001]. Al revisar el

trabajo [Kenjo, 1985] se tiene como objetivo modelar las tres fases del motor BLDC y analizar su comportamiento dinámico utilizando Matlab y simulink. Se realiza un estudio sobre el modelado matemático del mismo y una descripción de las características tales como comparativas del motor brushless y motores convencionales de corriente directa. Del mismo modo [Vepa, 2013] da un enfoque similar al realizar el análisis de esta máquina con la diferencia de la incorporación de expresiones matemáticas que describen la secuencia de activación de los transistores que componen el inversor trifásico que acciona cada bobina del motor. Se utiliza el modelo matemático del motor para la observación de su comportamiento en simulink.

En [BOSE, 2002] desglosan el método para obtener el modelo matemático del motor brushless de DC dando una mejor perspectiva al análisis dinámico de este sistema además de ejemplificaciones sobre el uso de herramientas de programación por bloques para el análisis de las ecuaciones.

En [Mohan, 2009] se muestra de una forma más detallada el modelo matemático del motor brushless de CD, así como la simulación de este. Desglosa las ecuaciones que describen el comportamiento tanto de voltajes, así como de corriente, ecuaciones de movimiento que contiene los torques con los que la máquina opera como motor. Se desglosa de qué forma se implementan las ecuaciones para la simulación mediante bloques.

Al analizar [Rashid, 2011] se reportan pruebas de un generador síncrono y un generador brushless de corriente directa. El estudio muestra un análisis de la potencia entregada por el generador. Resalta la principal diferencia entre estos dispositivos, el generador síncrono genera una forma de onda de tipo sinusoidal, mientras que el generador BLDC genera ondas de tipo trapezoidal. Sin embargo, físicamente esto no se cumple en todos los casos.

[Ortega, 2016] Trabaja en un algoritmo para controlar la máquina con la técnica de modulación (SVPWM) la cual permite aprovechar un pequeño porcentaje extra de la energía del bus de DC en el ESC se realiza un análisis matemático de la técnica aplicando transformaciones como Clark y Park, que da lugar a una simulación para observar las gráficas del voltaje y corriente. Finalmente reporta la implementación

del algoritmo en un microcontrolador de bajo costo. Dentro del tema de sensado de posición [Gençer, 2016] Brinda una solución para conocer la posición del rotor de una máquina sin escobillas utilizando sensores de efecto Hall, se revisan métodos para la colocación de estos sensores, se analizan las señales entregadas por estos y se determina la secuencia dada en código binario. Sugiere algunos microcontroladores de bajo costo para implementar algoritmos de lectura de dichos sensores.

En análisis de controladores en [Xue, 2020] Proponen un diseño para la aplicación de un controlador PID adaptativo basado en algoritmos genéticos, en base a la función de transferencia del motor los autores desarrollan una simulación para obtener las ganancias del controlador PID. El error es analizado como un problema de optimización para mejorar el comportamiento del dispositivo.

En [Gujjar, 2017] se hace el desarrollo del modelado dinámico de un motor brushless de corriente directa actuando como un generador eléctrico, se desglosan las ecuaciones necesarias para poder realizar una simulación precisa del comportamiento del generador para aprovechar la potencia generada de la mejor manera. Se realiza un análisis para la sintonización de controladores de corriente que aumenten la potencia entregada por el motor. El análisis es realizado para un sistema renovable obtenido de la energía eólica.

Para reducir dificultades de simulación [Laczko, 2015] realiza una simplificación en cuanto a la simulación del motor brushless tomando 4 módulos principales: El módulo del voltaje, módulo de fuerza contraelectromotriz, módulo del torque electromagnético y el módulo de la ecuación de movimiento. Estos 4 módulos son unidos en un subsistema que representa al motor BLDC, el cual permite implementar módulos de control de velocidad, generadores PWM entre otros análisis para la velocidad del motor.

[Halvaei, 2015] es un documento que presenta un método para análisis de la potencia entregada por un ESC basado en 6 conmutadores electrónicos utilizando la transformada discreta de Fourier, este método es programado en un microcontrolador para poder realizar mediciones de comportamiento del ESC en tiempo real por lo cual es un método útil para evaluar la calidad de la potencia

entregada por el variador de velocidad. Dentro del análisis de ESC's en [Guimerá, 2018] se realiza una comparativa entre la técnica de modulación senoidal y vectorial para la operación de un motor brushless, el análisis se realiza mediante una simulación presentando algunas ventajas y desventajas de ambas técnicas.

Para aplicaciones de modulación vectorial en [Balaji, 2015] y [Gaballah, 2012] se desarrolla un algoritmo de conmutación vectorial cambiando el enfoque de programación para hacer un proceso eficiente para la variación de velocidad de un motor brushless. [Prasad, 2012], [Lee, 2003] y [Kolano, 2020] Incluyen mejoras en el proceso de simulación de motores brushless, los parámetros son obtenidos de máquinas físicas reales con características suficientes para validar los resultados. En [Nguyen, 2020], [Xin, 2011], [Lee, 2005], [Rahman, 2018] y [Gujar, 2017] se evalúan diferentes propuestas en simulación para mejorar el rendimiento del comportamiento de velocidad de la máquina brushless como motor eléctrico.

## 2. Métodos

En el caso específico de motores brushless trifásicos se utiliza un ESC (Electronic Speed Control), que consiste básicamente en 6 conmutadores electrónicos que proporcionan la energía a cada fase de acuerdo de las señales de control, el esquema que se muestra en la figura 1 permite apreciar la conformación básica de un ESC para un motor sin escobillas.

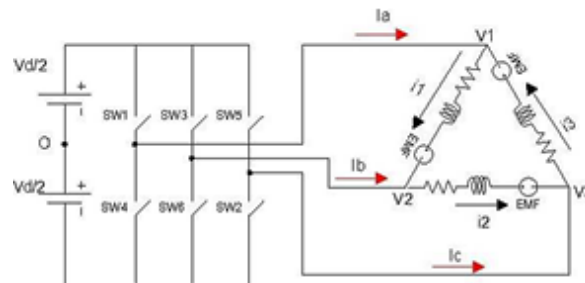


Figura 1 Configuración básica de un ESC [Balaji, 2015].

Las características del motor brushless utilizado en este proyecto son las siguientes:

- Configuración Delta
- 4 polos

- 160 volts
- 3000 RPM
- Sensores de efecto hall

El dispositivo implementado como driver de compuerta permite amplificar las señales enviadas desde una tarjeta de control (microcontrolador). Al tratarse de un ESC para un motor brushless trifásico se utilizan 3 dispositivos de compuerta con 6 transistores de potencia. La configuración final del driver se muestra en figura 2 realizada en Proteus® para fines de simulación el software omite algunos pines:

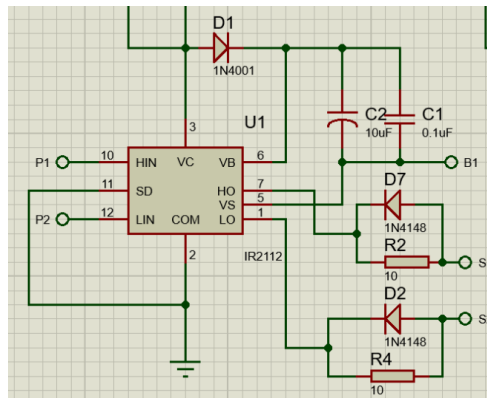


Figura 2 Configuración de driver de compuerta IR2110 para ESC.

Al igual que un inversor trifásico, el ESC se constituye por una rama superior y una rama inferior con 3 transistores de potencia por rama. Si se utilizan transistores del mismo canal (N o P), la rama superior representa un problema para la polarización ya que la carga a alimentar está conectada directamente a los medios puentes de MOSFET, si a su vez la rama superior es referenciada directamente a GND se provocará un corto circuito que dañará gravemente todo el sistema.

Para esto el driver brinda la solución; una fuente flotante que consiste en un diodo de protección conectado a la fuente de 10 - 20 Volts y un capacitor. Internamente el IR2110 cuenta con una configuración tótem-pole entre los pines VB y VS. El pin HO se conecta a la compuerta del transistor, la conexión entre ambos transistores debe ser conectada al pin VS, en caso de utilizar un capacitor electrolítico la terminal negativa también es conectada a la terminal VS. Se observa que el capacitor es

cargado desde un inicio, cuando HO envía una señal el capacitor se descarga brindando el voltaje de umbral necesario para polarizar el transistor.

Para la operación de la máquina sin escobillas como motor eléctrico primero se obtiene la lectura de posición del rotor. Para describir el funcionamiento del ESC se toma como referencia la figura 3, de acuerdo con el sentido de giro deseado se deben habilitar los interruptores de acuerdo con la secuencia entregada por los sensores, esta secuencia se repite 2 veces y cada valor es entregado cada 30°.

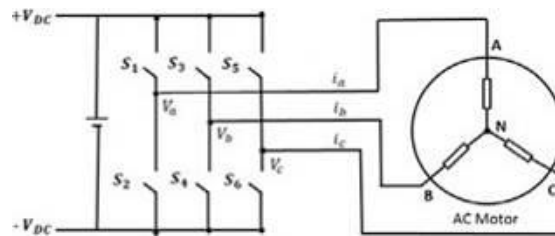


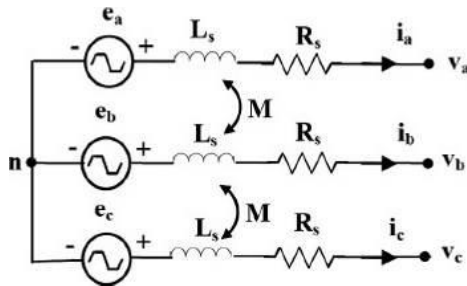
Figura 3 Circulación de corrientes a través de un motor A [Gaballah, 2012].

La máquina brushless requiere que se activen 2 fases de acuerdo con la combinación de los sensores hall el cual detecta los campos magnéticos del rotor de imanes permanentes, por ejemplo, si se activa el interruptor S1 y S6 fluiría una corriente desde la terminal positiva de la fuente de DC a través de la bobina "A", después continúa su circulación por la bobina "C" para fluir a través del interruptor S6 hacia el terminal negativo de la fuente. La tabla 1 muestra la secuencia entregada por los sensores de efecto Hall para conocer la posición del rotor, esta secuencia al ser programada permite el giro del dispositivo.

Tabla 1 Tabla de verdad para giro de motor brushless.

SENSORES HALL	S1	S2	S3	S4	S5	S6	$i_A$	$i_B$	$i_C$
101 – 5	1	0	0	1	0	0	+	-	0
001 – 1	0	0	0	1	1	0	0	-	+
011 – 3	0	1	0	0	1	0	-	0	+
010 – 2	0	1	1	0	0	0	-	+	0
110 – 6	0	0	1	0	0	1	0	+	-
100 – 4	1	0	0	0	0	1	+	0	-
000 – 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
111 – 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Para trabajar la máquina como generador eléctrico se comienza obteniendo las ecuaciones que describen el comportamiento dinámico de la misma comenzando con el diagrama de la figura 4.



Fuente: [Ortega, 2016]

Figura 4 Diagrama eléctrico de una máquina BLDC como generador eléctrico.

El diagrama eléctrico involucra los parámetros  $e_x, L_s, M, R_s, i_x, V_x$  que representan el voltaje generado, Inductancia de fase, Inductancia mutua entre bobinados, resistencia de fase, corrientes de fase, y lectura de voltaje de fase respectivamente. Despejando voltajes de cada fase se obtienen finalmente las ecuaciones 1, 2 y 3.

$$e_a = R_s i_a + (L_s - M) \frac{di_a}{dt} + V_a \quad (1)$$

$$e_b = R_s i_b + (L_s - M) \frac{di_b}{dt} + V_b \quad (2)$$

$$e_c = R_s i_c + (L_s - M) \frac{di_c}{dt} + V_c \quad (3)$$

Los voltajes de fase trapezoidal son una función de la posición del rotor  $\theta$  y tienen la amplitud descrita por la ecuación 4.

$$E = K_e \omega_r \quad (4)$$

Se asume que las 3 fases son idénticas por lo cual las funciones dependientes de la posición del rotor son dadas por las ecuaciones 5, 6 y 7. Donde:

$T_e$ : torque electromagnético desarrollado por el generador

$T_L$ : Es el torque dado en la flecha del generador

$J$ : Momento de inercia

$B$ : Coeficiente de fricción viscosa



$$e_a = \begin{cases} \left(\frac{6E}{\pi}\right)\theta_r & 0 < \theta_r < \frac{\pi}{6} \\ E & \frac{\pi}{6} < \theta_r < \frac{5\pi}{6} \\ -\left(\frac{6E}{\pi}\right)\theta_r + 6E & \frac{5\pi}{6} < \theta_r < \frac{7\pi}{6} \\ -E & \frac{7\pi}{6} < \theta_r < \frac{11\pi}{6} \\ \left(\frac{6E}{\pi}\right)\theta_r - 12E & \frac{11\pi}{6} < \theta_r < 2\pi \end{cases} \quad (5)$$

$$e_b = \begin{cases} -E & 0 < \theta_r < \frac{\pi}{2} \\ \left(\frac{6E}{\pi}\right)\theta_r - 4E & \frac{\pi}{2} < \theta_r < \frac{5\pi}{6} \\ E & \frac{5\pi}{6} < \theta_r < \frac{9\pi}{6} \\ -\left(\frac{6E}{\pi}\right)\theta_r + 10E & \frac{9\pi}{6} < \theta_r < \frac{11\pi}{6} \\ -E & \frac{11\pi}{6} < \theta_r < 2\pi \end{cases} \quad (6)$$

$$e_c = \begin{cases} E & 0 < \theta_r < \frac{\pi}{6} \\ -\left(\frac{6E}{\pi}\right)\theta_r + 2E & \frac{\pi}{6} < \theta_r < \frac{\pi}{2} \\ -E & \frac{\pi}{2} < \theta_r < \frac{7\pi}{6} \\ \left(\frac{6E}{\pi}\right)\theta_r - 8E & \frac{7\pi}{6} < \theta_r < \frac{9\pi}{6} \\ E & \frac{9\pi}{6} < \theta_r < 2\pi \end{cases} \quad (7)$$

El torque es expresado por la ecuación 8.

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r \quad (8)$$

### 3. Resultados

Después de pruebas variadas se consigue el diseño final del ESC para la máquina sin escobillas mostrado en la figura 5, un potenciómetro leído por el microcontrolador controla las señales PWM que permiten el control manual de

velocidad de la máquina sin escobillas. A 160 V el motor alcanza una velocidad de 2500 RPM consumiendo una cantidad muy baja de corriente en comparación con otras opciones, la figura 6 muestra la tarjeta final para la operación de la máquina brushless como motor eléctrico.

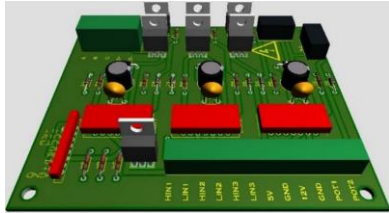


Figura 5 PCB para construcción de ESC.

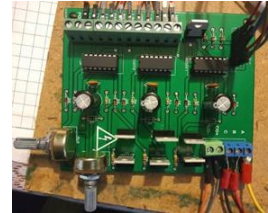


Figura 6 Tarjeta ESC implementada.

Al finalizar las pruebas físicas de la máquina como motor eléctrico, se realiza una simulación para el análisis de comportamiento como generador eléctrico. La figura 7 muestra el diagrama de bloques de dicho sistema, un escalón representa la velocidad ingresada en la flecha del generador, en la salida se tienen 3 señales de voltaje, las cuales son ingresadas a una carga  $RL$  y a un rectificador trifásico respectivamente.

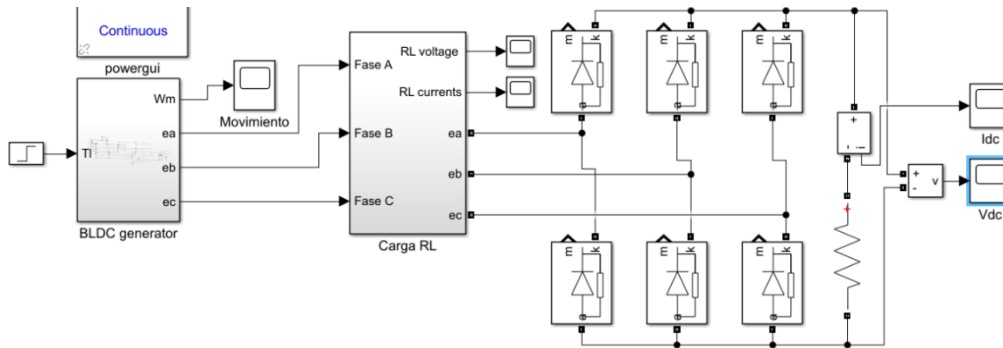


Figura 7 Diagrama de bloques para simulación de generador BLDC.

Se muestra en la figura 8 la velocidad alcanzada en la flecha del generador que es de 3000 RPM en las primeras pruebas, se selecciona esta velocidad ya que en el sistema físico las pruebas experimentales se realizan a una velocidad cercana.

La figura 9 muestra los voltajes generados sin ser ingresados a ninguna carga eléctrica a 3000 RPM la amplitud mostrada es de alrededor de 75 V de AC se

observa que las formas de onda son del tipo trapezoidal con un desfase de  $120^\circ$  la frecuencia de estas es variable debido a que la velocidad del generador en aplicaciones reales también será variable. En la figura 10 se muestran los voltajes a través de la carga  $RL$  trifásica, con una amplitud cercana a 60 V, se puede observar que las ondas trapezoidales asemejan ahora a ondas de tipo sinusoidal.

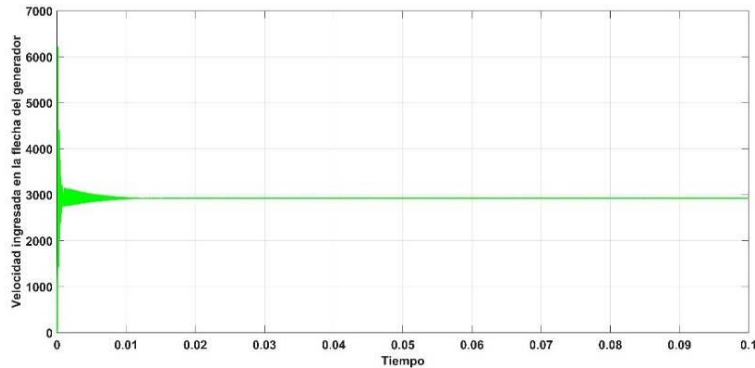


Figura 8 Velocidad en la flecha del generador.

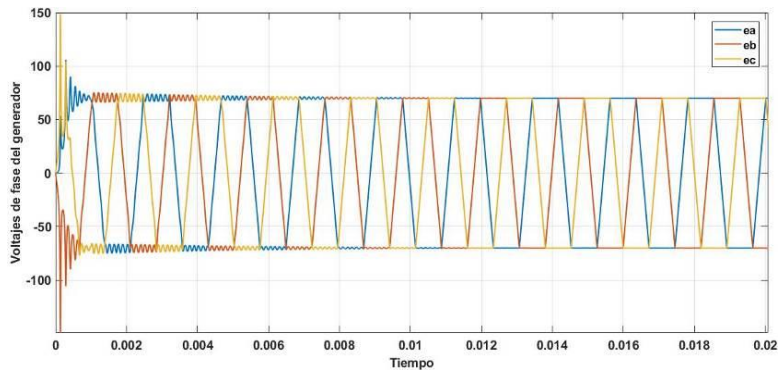


Figura 9 Voltajes de fase generador BLDC.

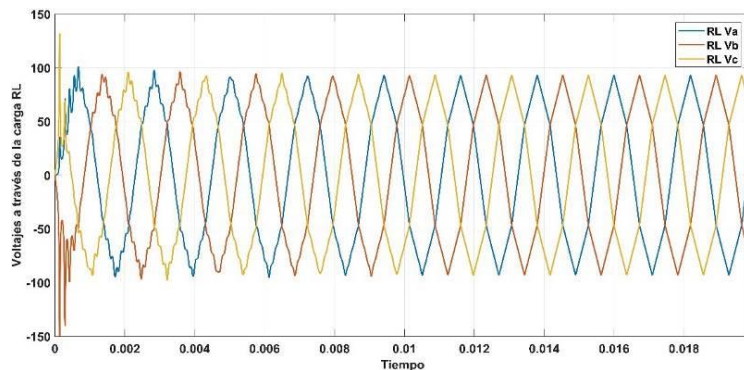


Figura 10 Voltajes en carga RL.

La figura 11 muestra las corrientes a través de la carga con una amplitud de alrededor de 0.4 A, en esta ocasión las corrientes tienen una forma de tipo senoidal.

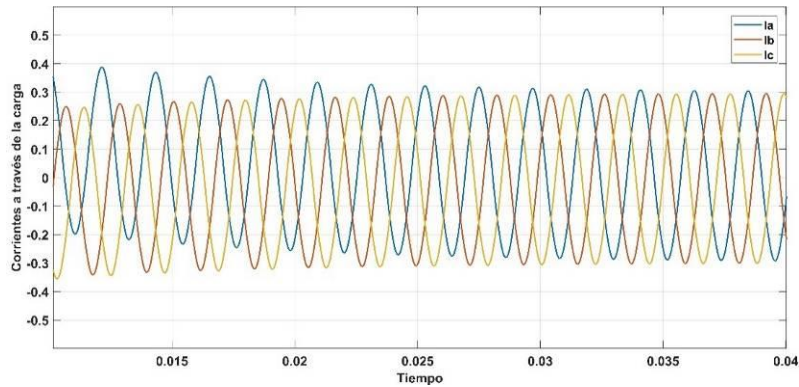


Figura 11 Corrientes a través de carga RL.

La figura 12 muestra el voltaje leído en la salida del rectificador trifásico, se muestra un voltaje ideal de 150 V estable, el objetivo de este voltaje es que pueda ser utilizado para ser enviado a bancos de baterías y así alentar el tiempo de descarga de las mismas mediante el frenado generativo.

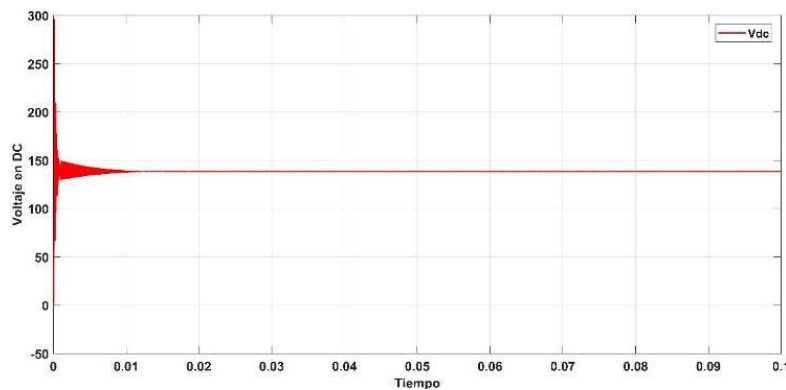


Figura 12 Voltaje en CD.

La corriente a través de la resistencia de carga del rectificador trifásico se muestra en la figura 13 con un valor de 0.15 A estos datos son de gran utilidad previo a pruebas físicas experimentales. Una vez realizado el estudio mediante simulación se da paso a pruebas experimentales, la figura 14 muestra la lectura hecha con el osciloscopio para la fase A, esta lectura fue realizada sin carga eléctrica se aprecia

claramente una forma de onda del tipo trapezoidal, la cual con carga eléctrica según su naturaleza (resistiva, inductiva o capacitiva) se verá afectada.

Se monta el puente rectificador trifásico y se conectan las fases de la máquina, la figura 15 muestra la lectura hecha con el osciloscopio. Se aprecia un voltaje en DC de 140 V obtenidos en la salida del rectificador trifásico.

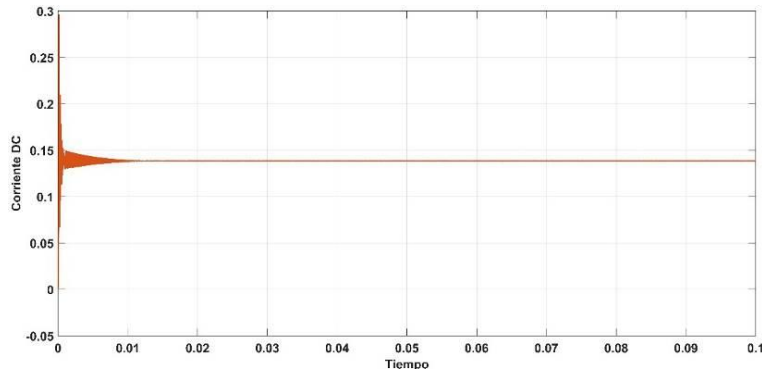


Figura 13 Corriente en CD.

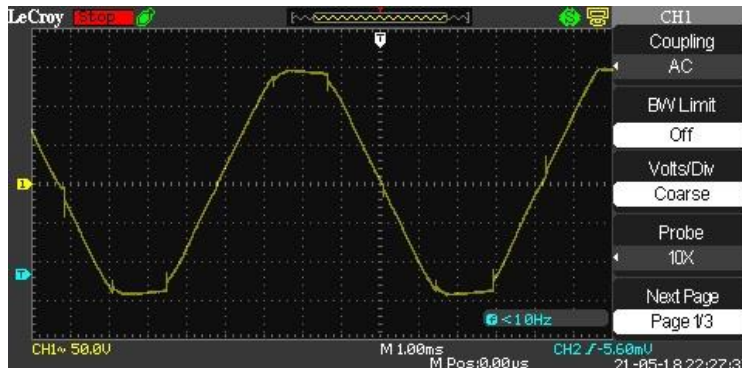


Figura 14 Fase A del generador BLDC.

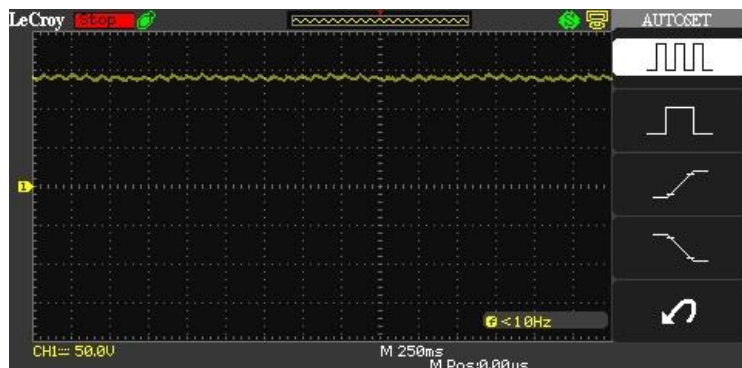


Figura 15 Voltaje rectificado.

Un motor AC que proporciona la fuerza motriz al generador se desconecta de la toma de alimentación y se mide el tiempo que el generador proporciona energía hasta que se detiene completamente, de acuerdo con la escala del osciloscopio la figura 16 muestra que el rectificador brinda energía al menos por 2 segundos sin carga eléctrica. El sistema mecánico motriz para proporcionar movimiento al generador es rígido lo cual ocasiona baja inercia al momento del frenado. La figura 16 muestra el tiempo que proporciona energía con carga eléctrica.

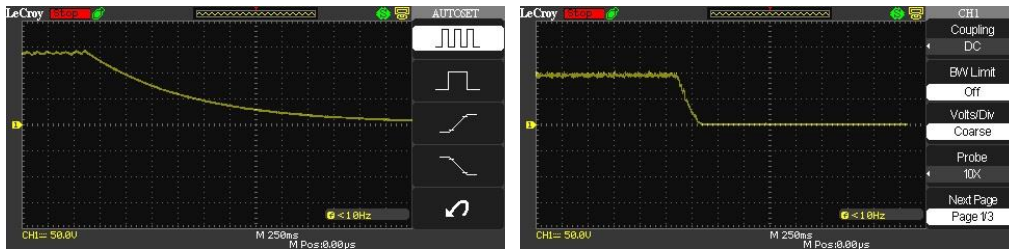


Figura 16 Pruebas experimentales de frenado generativo.

La tabla 2 muestra los resultados obtenidos a distintas velocidades, se conectan 3 lámparas comunes en configuración estrella y delta.

Tabla 2 Resultados experimentales de máquina brushless como generador.

Tipo de conexión	Voltaje línea a línea	Voltaje línea a neutro	Voltaje rectificado	Velocidad
Estrella	80V	55V	115V DC	3500rpm
Delta	97V	NA	133V DC	3210rpm

#### 4. Discusión

Las topologías de recolección de energía de un generador eléctrico incluyen rectificadores pasivos, activos y convertidores DC-DC esto permite la conversión de corriente alterna en corriente directa, para eficientizar controladores de corriente pueden ser implementados en estos dispositivos a través de PLL's [Rashid, 2011]. La propuesta inicial es electrónica, el ESC permite sensor correctamente la velocidad para ambos casos, lo cual hace viable la implementación de controladores de velocidad. Para la operación como motor eléctrico los transistores de efecto de campo son una excelente opción para este tipo de motores.

Para aprovechar ambas cualidades de esta máquina eléctrica se experimenta sobre la generación de energía eléctrica, a pesar de velocidades variables la lectura de la fuerza contraelectromotriz muestra formas de onda de tipo trapezoidal con amplitud estable, a través de un rectificador pasivo se obtiene corriente directa para poder ser aprovechada.

## **5. Conclusiones**

En este proyecto se realiza una propuesta para la conmutación de una máquina sin escobillas, una conmutación que permite su operación como motor eléctrico y/o generador eléctrico. Comenzando con la construcción de un ESC basado en transistores de efecto de campo y controlado mediante PWM lo cual permite un control efectivo de velocidad. Al operar la máquina en todo su rango de voltaje se concluye que el torque generado es bueno y crece conforme aumenta la velocidad del dispositivo, además la corriente consumida por la máquina es muy baja adquiriendo una ventaja sobre otros dispositivos trifásicos. El ESC propuesto se puede utilizar para cualquier máquina sin escobillas con sensores de efecto Hall en un rango de voltaje de 0 a 200 V. Después de obtener los resultados de operación como motor eléctrico, se hace uso del modelo matemático de la máquina sin escobillas como generador eléctrico para realizar una simulación en la que se hace un estudio de comportamiento como un sistema trifásico y una fuente de DC. Las gráficas obtenidas tienen una variación mínima debido a los parámetros utilizados. Además, se efectúa un análisis de la utilización de frenado generativo.

Durante las pruebas experimentales se realizan diferentes lecturas de voltaje con y sin carga eléctrica, se valida la simulación realizada tomando los siguientes criterios: La amplitud de los voltajes generados depende de la velocidad alcanzada por el generador, la frecuencia de onda es variable por el mismo motivo. Al rectificar el voltaje generado se obtiene DC estable para ser entregado a dispositivos recargables.

Se logra un sistema físico de 2 etapas, las cuales, mediante el uso de relevadores permiten la conmutación de la máquina para su operación como motor y como generador eléctrico.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Balaji, M., Artist, Speed control of BLDC motor drive using SVPWM inverter. National Institute of technology Rourkela, 2015.
- [2] BOSE, B. K., Modern Power Electronics and AC Drives, United States of America: Prentice Hall, 2002.
- [3] Gaballah, M. M., Desing and implementation of space vector PWM inverter based on a low cost microcontroller, Research gate, pp. 1-12, 2012.
- [4] Gençer, Ç., Gedikpinar, M., Modeling and simulation of BLDCM using MATLAB/SIMULINK, Science alert, pp. 2-5, 2006.
- [5] Guimerá M., Artists, J., Desarrollo de un sistema de control de inversor basado en microcontrolador para un banco de ensayos de accionamientos eléctricos. Universidad politécnica de València, 2018.
- [6] Gujjar, M. N., Kumar, P., Comparative analysis of Field oriented control of BLDC motor using SPWM and SVPWM techniques, IEEE, pp. 1-6, 2017.
- [7] Halvaei, Niasar, A., Sabbaghean, A., Desing and implementation of a low-cost maximization power conversion system for brushless DC generator, Aim Shams Engineering, pp. 1-10, 2015.
- [8] Kenjo, T. y Nagamori, S., Permanent-Magnet and brushless DC Motors, New York: Oxford science publications, 1985.
- [9] Kolano, K., Determining the position of the Brushless DC motor rotor, energies, pp. 1-9, 2020.
- [10] Krishnan, R., Electric motor drives modeling, analysis, and control, New Jersey: Prentice hall, 2001.
- [11] Laczko, A. A., Zaharia, M. V., Radulescu, M. M., Brisset, S., Modeling and simulation of a brushless DC permanent-magnet generator-based wind energy conversion system, EVER, pp. 1-7, 2015.
- [12] Lee, B., Ehsani, M., Advanced Simulation model for Brushless DC motor drives, Taylor & Francis, pp. 2-29, 2003.
- [13] Nguyen, Khanh, C., Balasooriya, S., Kavalchuk, I., Karpukhin, K., Terenchenko, A., Novel adaptative control method for BLCD drive of electric bike for Vietnam Enviroment, pp. 2-10, 2020.



- [14] Lee, H. W., Practical control for improving power density and efficiency of the BLDC generator, IEEE, pp. 1-8, 2005.
- [15] Mohan, N., Undeland, T. M., y Robbins, W. P., *Electronica de potencia*, México D.F.: McGrawHill, 2009.
- [16] Ortega R., Carranza O., Sosa J. C., García, V., Hernández, R., *Diseño de controladores para inversores monofásicos operando en modo isla dentro de una microred*, Elsevier, pp. 1-12, 2016.
- [17] Prasad, G., Sree Ramya, N., Prasad, P. V. N., Tulasi Ram Das, G., *Modelling and simulation analysis of the brushless DC motor by using MATLAB*, IEEE, pp. 1-5, 2012.
- [18] Rahman, Rony, Z., Chandra, Dasand, S., Rahman Khan, M. Z., *Space vector modulated PWM generation for motor control systems*, Research Gate, pp. 2-5, 2018.
- [19] Rashid, M. H., *Power electronics handbook devices, circuits, and applications*, Florida: Elsevier inc., 2011.
- [20] Vepa R., *Dynamic Modeling, Simulation and Control of Energy Generation*, London: Springer, 2013.
- [21] Xin, X., Luo, Y., Xu, Hexiu, Zhang, H., *A new method of brushless dc motor control system simulation*, IEEE, pp. 1-4, 2011.
- [22] Xue X., Teh, Y. K., *Power quality evaluation of six-step commutation brushless DC motor implemented on 32-Bit ARM cortex microcontroller*, IEEE, pp. 1-4, 2020.