



Recibido: 18 de abril de 2023  
Aceptado: 30 de abril de 2023

CATEGORIA Tecnología  
DOI 10.59157/redicyt1120233

## La estrategia de freno regenerativo: Una opción para mejorar la autonomía de los vehículos eléctricos.

Dr. Juan Carlos Núñez Dorantes  
<https://orcid.org/0000-0002-8672-5496>  
[juan.dorantes@utcv.edu.mx](mailto:juan.dorantes@utcv.edu.mx)

Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz  
Cuitláhuac, Veracruz, México

Dr. Eduardo Mael Sánchez Coronado  
<https://orcid.org/0000-0002-7593-4524>  
[eduardo.sanchez@utcv.edu.mx](mailto:eduardo.sanchez@utcv.edu.mx)

Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz  
Cuitláhuac, Veracruz, México

### Síntesis.

El freno regenerativo es una estrategia de frenado utilizada en Vehículos Eléctricos (VE) para recuperar energía y recargar la batería al momento en que el VE se encuentra bajo situación de freno.

### Cuerpo del Artículo

#### Implementación del sistema de freno regenerativo en el vehículo eléctrico.

Los vehículos eléctricos usan comúnmente motores conocidos como “Brushless” (sin carbones) debido a su bajo costo, poco mantenimiento, mejor torque y mayor rango de velocidad. Son alimentados por corriente continua. Para hacerlos funcionar se requiere de un convertidor de corriente continua (CC) a corriente alterna (CA) (conocido como inversor) que permita generar los pulsos eléctricos adecuados para la conmutación de los inductores. El motor consiste de una parte fija (estator, que tiene seis inductores) y una parte móvil (rotor, que tiene 3 sensores de efecto Hall). Cuando los sensores de efecto Hall detectan el campo magnético de los inductores, se envía un pulso a un microcontrolador y este, a su vez, envía el pulso al inversor para hacer que el motor gire  $60^\circ$ . La acción combinada de los seis inductores hará que el motor gire contantemente los  $360^\circ$  para dar una vuelta completa.

La figura 1 muestra el diagrama eléctrico de un inversor de tres fases y el circuito equivalente del motor “brushless” donde  $L$  es la inductancia (capacidad del inductor de almacenar campo magnético);  $R$  es la resistencia eléctrica (capacidad de impedir el paso de la corriente) del motor y  $ea$ ,  $eb$  y  $ec$  son los voltajes de cada fase. Los elementos marcados por S1 al S6 son los interruptores que hacen que el motor gire cuando se aplica la combinación correcta.

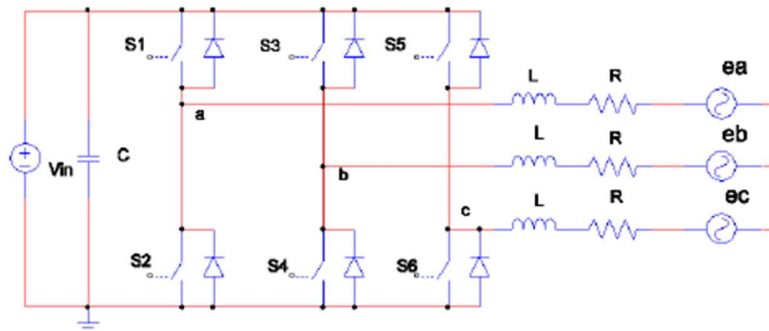


Fig. 1. Circuito equivalente del motor BLDC y su circuito inversor.

Para estos interruptores comúnmente se utilizan transistores de efecto de campo de metal óxido semiconductor (MOSFET) o transistores bipolares de compuerta aislada (IGBT). Los primeros tienen una gran capacidad de pasar el apagado al encendido y viceversa a una gran velocidad mediante la aplicación de voltaje en la terminal denominada “compuerta”, mientras que los segundos utilizan la propiedad de conmutación de los MOSFET en tanto que tiene bajas pérdidas de voltaje debido a la conmutación.

El sistema trabaja en dos modos: el modo de tracción y el modo de regeneración.

Modo de tracción: Durante este modo, el motor consume energía de la batería, es decir, cuando se presiona el pedal del acelerador, la energía de la batería es consumida en proporción a la velocidad requerida y la carga mecánica que soporte el VE.

Modo de regeneración: Durante este modo, el motor le proporciona energía a la batería, permitiendo recargarla. Cuando se presiona el pedal de freno o se suelta el acelerador y el VE se encuentra viajando en posición “neutral” el motor sigue girando y por lo tanto los inductores están generando electricidad debido a la inercia, esta electricidad es enviada de vuelta a la batería.

Los pulsos adecuados aplicados a los interruptores S1 al S6 se indican en la figura 2. La figura 2a indica los pulsos adecuados para los 6 interruptores, donde los pulsos para S1, S3 y S5 son controlados por Modulación por Ancho de Pulso (PWM) mientras que los interruptores S2, S4 y S6 no son controlados de esta manera (en la figura 2, los pulsos indicados de Q1 a Q6 corresponden a los interruptores S1 al S6).

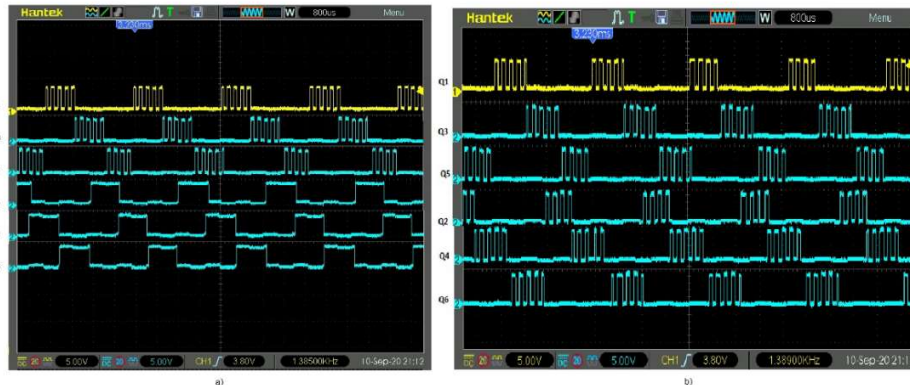


Figura 2. a) Señales de Q1 a Q6 en modo de tracción. b) Señales de Q1 a Q6 en modo de regeneración

La figura 2b indica los pulsos adecuados para los interruptores S1 al S6 y se muestra que todos son controlados por PWM.

Cuando el pedal del acelerador es liberado (o se presiona el pedal del freno), se envía una palabra de control al microcontrolador que le indica a este que haga el cambio para trabajar en modo de regeneración. El microcontrolador está programado para recibir un 1 lógico para trabajar en modo de tracción y un 0 lógico para trabajar en modo de regeneración.

Una vez lograda la conmutación de estos interruptores se hizo un análisis del estado de carga de la batería. Si el voltaje de la batería se considera constante, la pendiente de descarga de esta deberá ser menos pronunciada cuando se trabaja en modo de regeneración que cuando se trabaja en modo de tracción. La figura 3 muestra lo dicho. Cuando se trabajó con un ciclo de trabajo del 40%, con una carga mecánica de 25kg, un par de torsión de 30Nm y 78RPM para un ciclo de frenado de 4 segundos. Se observa que, la implementación con dispositivos IGBT permite mayor recuperación de energía que la que tiene la implementación con dispositivos MOSFET.

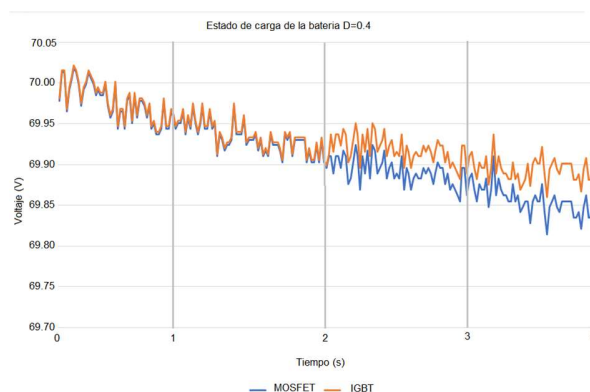


Figura 3. Estado de carga de la batería. Ciclo de trabajo del 40%, Par de torsión 30Nm, velocidad 78RPM, Carga mecánica 25Kg



El estudio mostró que esto se debe a que los dispositivos IGBT tienen un tiempo de subida (tiempo en que el interruptor pasa de apagado a encendido) más rápido que los dispositivos MOSFET, lo que permite que el tiempo de encendido (tiempo en el que el interruptor se mantiene cerrado) sea mayor, permitiendo que el inductor del motor se quede cargado durante mayor tiempo, permitiendo así mayor recuperación de energía y mejorando la autonomía del vehículo eléctrico.

El caso de estudio fue una motoneta eléctrica Naruto Ride E1 con una autonomía de 50kg por carga. Cuenta con una batería de Ion-Litio de 60V a 20AH que tarda 4 horas en cargarse completamente.

Este estudio mostró que la autonomía del VE mejoró en un kilómetro.

Este artículo fue extraído de la fuente que se muestra a continuación:

Núñez-Dorantes, J., Martínez-Sibaja, A., Rodríguez-Jarquín, J., Aguayo-Alquicira Jesús., M. (2022) COMPARACIÓN DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA EN EL SISTEMA DE FRENO REGENERATIVO EN UN VEHICULO ELÉCTRICO UTILIZANDO DISPOSITIVOS MOSFET Y EL MÓDULO INVERSOR IRAMY. <https://doi.org/10.6036/10668>. (Noviembre 2022)