

# El frenado regenerativo y los límites de la regeneración



Ricardo Berizzo  
Movilidad Eléctrica  
UTN Rosario  
rberizzo@gmail.com

El freno regenerativo es un dispositivo que permite reducir la velocidad de un vehículo transformando parte de su energía cinética en energía eléctrica. En trenes eléctricos, alimenta su fuente de energía; en vehículos de baterías y vehículos híbridos, la energía se almacena en un banco de baterías o en una batería de condensadores para un uso posterior. El frenado tradicional, basado en la fricción, se sigue usando para completar el frenado a velocidad cero durante el último tramo del mismo.

La clave de aplicación del frenado regenerativo es la utilización de la máquina eléctrica que funciona normalmente como motor, el generador de energía eléctrica. En este caso, la acción de generar energía eléctrica determina un par de oposición al movimiento, que se traduce en un efecto de desaceleración del móvil. No todos los tipos de motores eléctricos son óptimos para generar energía eléctrica.

---

*Para comprender el funcionamiento del freno regenerativo de un coche eléctrico hay que tener en cuenta un proceso en el que están íntimamente involucrados el motor/generador y el controlador (inversor).*

---

## Breve explicación del mecanismo de regeneración

Para comprender el funcionamiento del freno regenerativo de un coche eléctrico hay que tener en cuenta un proceso en el que están íntimamente involucrados el motor/generador y el controlador (inversor).

Cuando el controlador electrónico funciona en modo motor, toma la corriente continua de las baterías, la transforma en una onda eléctrica alterna y alimenta el motor. Esa energía sobre el arrollamiento del estator (elemento fijo) genera

un campo magnético que interactúa con el rotor (elemento rotante). De esa manera se genera el movimiento del rotor junto a un par motriz que varía en función de la fuerza de tracción que requiera el conductor mediante el acelerador, que es el elemento que le da "órdenes" al inversor.

Cuando el conductor levanta el pie del acelerador, el controlador eléctrico hace que el sistema motor/inversor pase a modo generador. De esta forma, deja de enviar electricidad al estator y el campo magnético que "empujaba" el vehículo desaparece, pero el rotor sigue girando a causa de la energía cinética remanente del vehículo, y es en ese momento cuando la máquina eléctrica se convierte en generador.

Si se trata de un motor asincrónico, el inversor tendrá que crear ciertas condiciones eléctricas para que este pueda funcionar como generador. Si es una máquina sincrónica de imanes permanentes es más sencillo, ya que la generación le es inherente.

---

*Los inversores disponen de funciones para iniciar y finalizar la actuación de los generadores automáticamente, es por esto que su aplicación en el sistema de freno regenerativo es imprescindible.*

---

El circuito electrónico llamado "inversor" transforma la electricidad de corriente continua (CC) almacenada en las baterías eléctricas en energía de corriente alterna (CA), y viceversa. Los inversores disponen de funciones para iniciar y finalizar la actuación de los generadores automáticamente, es por esto que su aplicación en el sistema de freno regenerativo es imprescindible; además, la capacidad del inversor para procesar distintas formas de energía de entrada lo convierte en una opción necesaria en aplicaciones de energía portátil, de respaldo y sin conexión directa a la red como en vehículos eléctricos.

En el caso del motor de inducción, el inversor debe estar presente para suministrar energía al campo antes de que pueda actuar como generador, por lo que en ausencia de cualquier excitación de campo, el rotor sería solo un trozo de metal que gira. Sin embargo, el motor sincrónico de imanes permanentes siempre producirá un voltaje cuando su eje esté girando, y si su eje gira mucho más rápido de lo que podría dar el voltaje disponible del paquete de baterías, entonces el inversor tiene que ajustar el tiempo de sus corrientes de fase para atenuar parcialmente los efectos del campo permanente (también conocido como "debilitamiento de campo"). El debilitamiento de campo se usa tanto en modo motor, como en modo generador; en el primero, permite que el motor gire más rápido a costa de disminuir el valor de par, mientras que en el segundo, evita la destrucción del inversor debido al exceso de corriente generada que regresa a la batería.

---

*La energía recuperada por regeneración tiene que pasar por el proceso de conversión completo, de químico a eléctrico, de mecánico a vial, dos veces.*

---

La energía recuperada por regeneración tiene que pasar por el proceso de conversión completo, de químico a eléctrico, de mecánico a vial, dos veces. Las eficiencias típicas para cada paso en este proceso son 99% para baterías de química de litio, 96 a 98% para inversores, 80 a 95% para motores (aunque esto puede ser menor, según el rango de potencia), 95% para diferenciales de engranajes de transmisión mecánica, y finalmente, 85 a 95% para neumáticos. Incluso tomando los mejores valores para cada cifra, se obtiene una eficiencia general de la batería al pavimento del 83% y una eficiencia de ida y vuelta del 69%; en otras palabras, se regenera una fracción de la energía cinética dado que hay muchos factores que influyen en el proceso.

## Existen límites energéticos de regeneración

El par máximo de regeneración es generalmente el mismo que durante la tracción, y aunque este par puede ser impresionante, todavía no se acerca a lo que pueden lograr los frenos mecánicos, por lo que la regeneración no puede sustituirlos completamente.

La ecuación para calcular la potencia efectiva de los frenos para desacelerar a velocidad cero una masa dada a una fuerza "g" es la conocida fórmula de potencia para acelerar un móvil

$$P = m \cdot a \cdot v \quad [1]$$

donde "P" se mide en watts, "m" es la masa medida en kilogramos, "a" es aceleración en metros sobre segundos al cuadrado y "v" es velocidad en metros sobre segundos.

Por ejemplo, el Audi e-tron Quattro 2019 (dos motores asíncronos: un motor de 181 Hp para el eje delantero y una unidad de 221 Hp para el trasero) tiene una masa estimada de 2.400 kg, y debe ser capaz de frenar a 0,8 g de desaceleración (1 g = 9,81 m/s<sup>2</sup>). Si viaja a 100 km/h (27,78 m/s), eso se traduce en una potencia de frenado de 523 kW. (Comparar este valor con la potencia total de sus motores: 300 kW).

El uso de la regeneración para desacelerar una velocidad demasiado baja podría no producir suficiente potencia para superar las pérdidas en los componentes eléctricos de la transmisión. Esto llevaría a que la regeneración disminuya el rango en comparación con el frenado mecánico. Anotar números exactos para estas pérdidas es notoriamente difícil, pero un rango razonable sería de 5 a 20 kW solo para los componentes eléctricos (mayor para vehículos más pesados/de mayor potencia/menos eficientes). En el ejemplo anterior, disminuir la velocidad de desaceleración a 0,01 g resultaría en 6,5 kW de potencia de regeneración aproximadamente, pero si las pérdidas eléctricas combinadas son, supongamos, 8 kW, entonces se producirán 1,5 kW aproximados de consumo adicional en la batería.

---

*Una vez que la velocidad se encuentra por debajo de un cierto valor, el sistema de regeneración no devolverá un valor importante de energía, incluso si la tasa de desaceleración es alta.*

---

Del mismo modo, una vez que la velocidad se encuentra por debajo de un cierto valor, el sistema de regeneración no devolverá un valor importante de energía, incluso si la tasa de desaceleración es alta.

La ecuación de energía cinética es

$$K_e = 0.5 \cdot m \cdot v^2 \quad [2]$$

donde "Ke" se mide en joules (o watts sobre segundos), "m" es la masa expresada en kilogramos y "v" es la velocidad en metros sobre segundos. La fórmula muestra que la energía generada disminuye drásticamente cuando disminuye la velocidad.

Un vehículo de 2.400 kg que viaja a 100 km/h tiene 926 kJ (0,26 kW/h) de energía recuperable, pero a 10 km/h se reduce a 0,0026 kW/h, o sea, cien veces menos. Incluso sin pérdidas para considerar, son solamente 2,6 W/h de energía.

Aunque no existe ningún sistema de recuperación de energía perfecto, el freno regenerativo recupera una gran parte de la energía (valor promedio 30%) que de otro modo se pierde totalmente en forma de calor disipado al medioambiente. Este detalle, en la ecuación energética total del vehículo, no es para desestimar. ■