Los daños generados por las corrientes de fuga y su impacto en los vehículos eléctricos

Julio A. **Cao-Romero-Gallegos**
Leonardo I. **Farfán-Cabrera**

Los autos eléctricos contienen cinco componentes principales en su tren motriz para su buen funcionamiento: unidad de control electrónico, baterías, convertidores (inversores) eléctricos, motor(es) eléctricos y transmisión por engranajes o caja reductora. Hay tres configuraciones comúnmente usadas en el mercado (ver Figura 1). La primera es el motor de cubo de rueda, comúnmente utilizado cuando se prioriza la compactibilidad, ligereza y eficiencia energética. Segunda, el motor central con transmisión de una marcha o multimarcha. El motor central con transmisión de una marcha es el más utilizado en vehículos eléctricos debido a su costo-beneficio. La arquitectura de esta configuración es la más simple, ya que el motor eléctrico va acoplado directamente a las ruedas por medio de una flecha, una caja reductora de engranajes y un diferencial. La caja reductora de engranajes se utiliza para compensar la alta velocidad a la que los motores eléctricos giran (>10,000 RPM) (Wu *et al*., 2018). Finalmente, está la configuración de multimotor, que puede incluir de dos a cuatro motores eléctricos, dependiendo del desempeño y la velocidad máxima deseadas en el automóvil. Precisamente, a partir de dos motores eléctricos se puede lograr una tracción integral

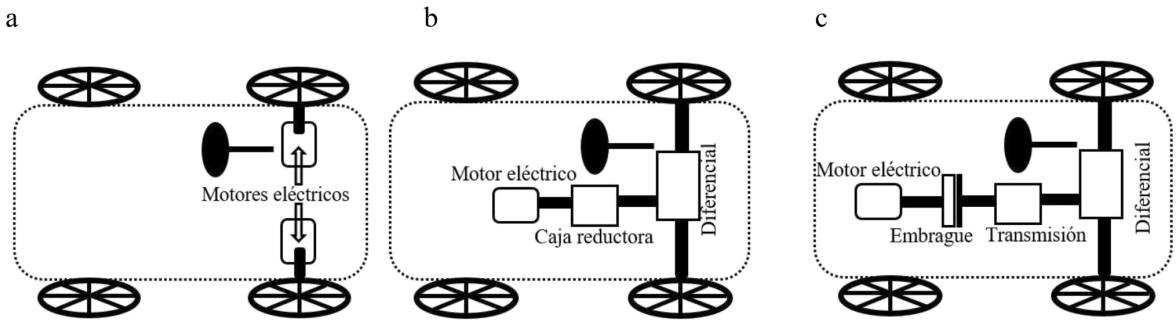


Figura 1. Configuraciones del tren motriz de autos eléctricos. a) Motor de cubo de rueda (*in-wheel motor*); b) motor central con transmisión de una marcha; c) motor central con transmisión multimarcha.

para condiciones de baja adherencia (como en situaciones de lluvia o nieve), y con cuatro motores eléctricos, una tracción para condiciones *off-road*.

Cuando se utiliza una transmisión multimarcha, el uso de la caja reductora ya no es necesario porque la transmisión compensa la velocidad de giro del motor eléctrico con las diferentes marchas. Incluso estas configuraciones permiten que el motor eléctrico opere con factores de carga más eficientes y mayor desempeño. Actualmente hay varios tipos de transmisiones multimarcha disponibles para autos eléctricos: transmisión de doble embrague (*dual-clutch*), transmisión de velocidad continua (*CVT*), transmisión manual automatizada y transmisión automática.

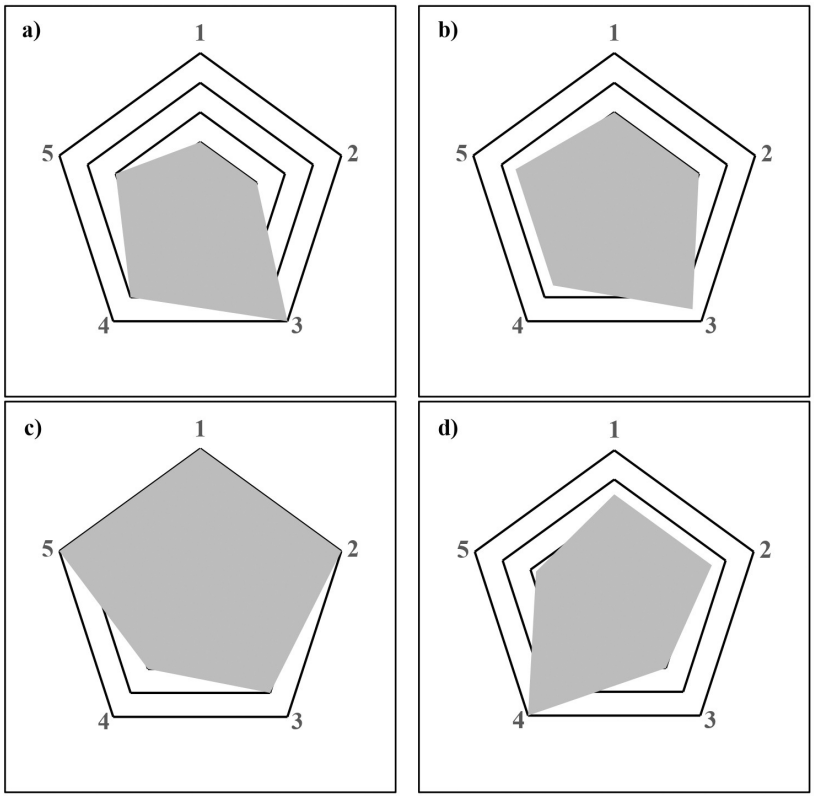
Además, hay distintos tipos de motores eléctricos utilizados en vehículos eléctricos. Entre ellos están el motor síncrono de imán permanente, motor de inducción, motor de reluctancia variable y el motor de corriente directa (*DC*) sin escobillas. Estos motores se utilizan según el desempeño deseado (como se muestra en la Figura 2). Hoy en día, el motor más utilizado para autos eléctricos es el motor síncrono de imán permanente debido a sus características y desempeño (Ramesh y Lenin, 2019).

FALLAS DE MOTORES ELÉCTRICOS

Los autos eléctricos son reconocidos por considerarse de bajo mantenimiento porque, en comparación con un auto de combustión interna, tienen menos componentes propensos a fallar por desgaste (Farfán-Cabrera L, 2019). Sin embargo, excluyendo el conjunto de baterías, uno de los componentes más críticos y propensos a fallar es el motor eléctrico (mostrado en la Figura 3). Los motores eléctricos pueden presentar fallas mecánicas y eléctricas. Desde fallas por vibraciones, hasta fallas por fluctuaciones de voltaje debido a los convertidores eléctricos; son estos últimos los que permiten la variación de velocidad del motor eléctrico. En ambos tipos de fallas, los componentes más propensos a dañarse son los rodamientos. Estadísticamente, se ha mencionado que alrededor del 40 % de las fallas de motores eléctricos se origina en los rodamientos (Singh y Ahmed Saleh Al Kazzaz, 2003). Además, el 8 % de estas fallas corresponde a fallas eléctricas por corrientes de fuga (Hadden *et al*., 2016).

LAS CORRIENTES DE FUGA

Las corrientes de fuga son producidas por diferentes fuentes como: efectos electromagnéticos, electrostática y voltajes inducidos por el inversor (Busse *et al*., 1997). Las corrientes de fuga son causadas porque se envían pulsaciones eléctricas de alta frecuencia al motor eléctrico para que gire, y hay situaciones en que las pulsaciones no se consumen por el motor. Así, las pulsaciones se fugan como corriente eléctrica hacia la flecha del motor y, en consecuencia, a diferentes componentes del tren motriz, como los rodamientos y los engranajes (mostrados en la Figura 4). Los rodamientos han sido los más comúnmente dañados debido a sus dimensiones y la pequeña cantidad de lubricante que utilizan.



a) Motor DC

b) Motor de inducción

c) Motor síncrono de imán permanente

d) Motor de reluctancia variable

1 Densidad de potencia

2 Eficiencia

3 Controlabilidad

4 Simplicidad del motor

5 Costo

Figura 2. Diferentes indicadores de desempeño de motores para autos eléctricos. Modificado de Ramesh y Lenin, 2019.

Muchos estudios han demostrado los daños severos que pueden causar las corrientes de fuga en los rodamientos de los motores eléctricos, y uno de los más completos ha sido escrito por He *et al*. (2020). Dependiendo de los materiales y lubricantes utilizados en los rodamientos, los daños más comunes y severos que pueden causarse por estas corrientes de fuga son: *fluting*, *frosting*, *pitting* y *welding* en casos extremos. Además, el lubricante (sea grasa o aceite) puede degradarse significativamente por estas corrientes, contribuyendo a un deterioro acelerado de los rodamientos. De hecho, se ha demostrado que la exposición de los lubricantes a corrientes eléctricas puede ocasionar: degradación térmica, separación de aditivos, oxidación, pérdida de viscosidad y lubricidad (Spikes H, 2020).

MITIGACIÓN DE LAS CORRIENTES DE FUGA

Se han propuesto diferentes soluciones eléctricas para evitar las consecuencias causadas por estas corrientes como: instalación de filtros sinusoidales, conexión a tierra de la flecha, blindaje eléctrico del cableado, ajuste de la conexión a tierra de la cubierta del motor, reducción de la frecuencia de salida del inversor, entre otros (Busse *et al*., 1997). En el caso de las soluciones mecánicas, se ha optado por instalar anillos deslizantes para conectar a tierra o desviar las corrientes de fuga, y aislamiento de los rodamientos mediante el uso de materiales cerámicos, ya sea como sustrato o recubrimiento (Hadden *et al*., 2016). Más recientemente, se ha investigado el uso de lubricantes como una opción complementaria para aportar protección contra los daños eléctricos derivados de las corrientes de fuga. En general, se ha recomendado que estos lubricantes contengan buenas propiedades de lubricidad, cuenten con alta resistencia dieléctrica y baja resistencia eléctrica. Esas características en el lubricante podrían obtenerse a través de los aditivos y la química que los componen. Los aceites de transformador son un buen ejemplo de fluidos diseñados para estar expuestos a condiciones de alta potencia eléctrica. Estos se formulan con muy baja viscosidad y con

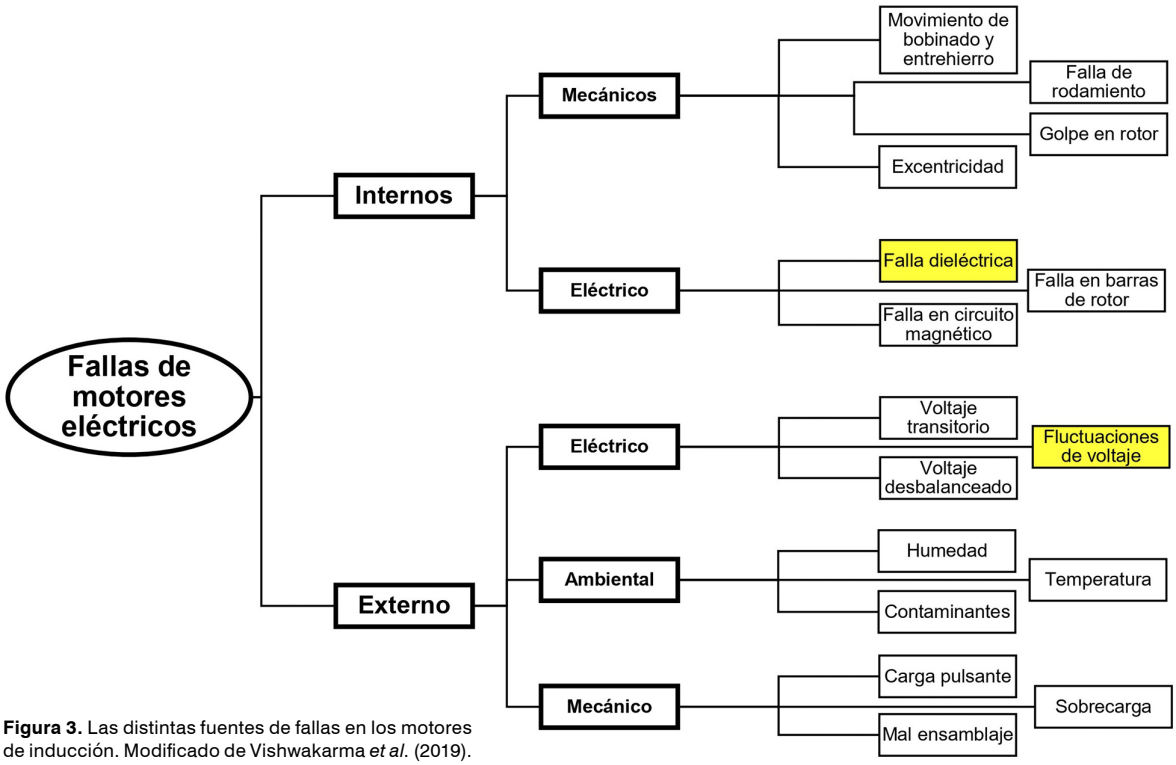


Figura 3. Las distintas fuentes de fallas en los motores de inducción. Modificado de Vishwakarma *et al.* (2019).

características de alta resistencia dieléctrica, baja conductividad eléctrica, alta estabilidad térmica y presencia de aditivos antioxidantes (Rajab *et al.*, 2016). Así, las correctas propiedades eléctricas en los lubricantes pueden disminuir el daño causado por las corrientes de fuga, ya que las descargas eléctricas producidas en los rodamientos o engranajes serían de menor ocurrencia e intensidad.

RETOS ACTUALES

Actualmente los autos eléctricos son un producto popular para su uso principalmente en ciudad, ya que su autonomía y la infraestructura para cargar las baterías aún son limitadas. Sin embargo, es importante considerar las corrientes de fuga, ya que afectan el desempeño, la confiabilidad y la durabilidad de los componentes del tren motriz. Es fundamental el estudio, diseño y el correcto uso de materiales para engranajes, rodamientos y lubricantes utilizados en el tren motriz de autos eléctricos. Para esto se utilizan máquinas tribológicas con instrumentación especial que permite estudiar materiales y lubricantes en condiciones que simulen las del tren motriz. De este modo es posible el desarrollo de materiales y fluidos adecuados para la fabricación de autos eléctricos (Farfán-Cabrera L, 2019).

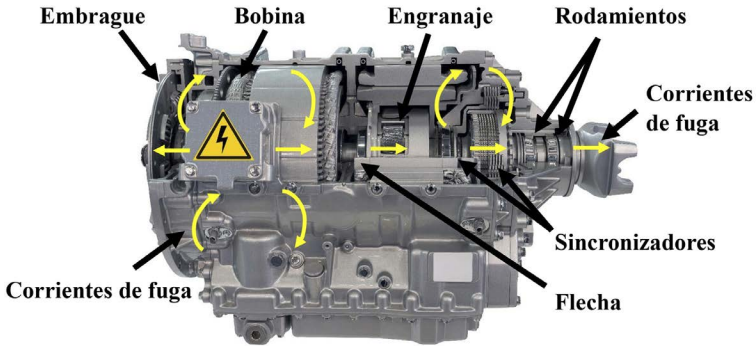
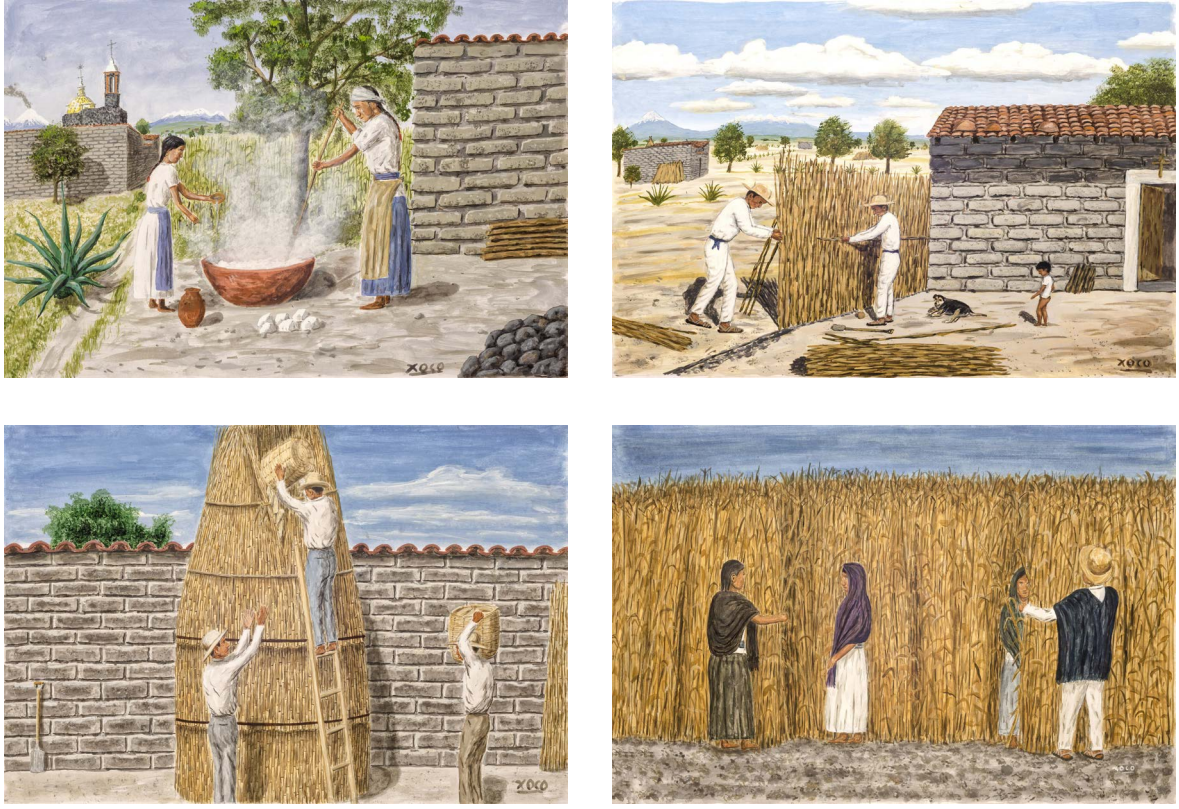


Figura 4. Componentes internos de un sistema de transmisión para un tren motriz hibrido. Se muestra el motor eléctrico y sus elementos de transmisión expuestos a las corrientes de fuga.



© Raúl Chiquito. a) *Cal viva.* Elaborando cal para usarse en el nixtamal. b) *Tallos de maíz*. Construyendo cerca con chinamites de maíz. c) *Llenando cencal*. Llenando cencal con mazorca. d) *Escondiendo mujeres*. Escondiendo mujeres en las montoneras de zacate durante la revolución.

G L O S A R I O

Fluting: la exposición a descargas eléctricas periódicas propicia la formación de estrías o surcos en las pistas de los rodamientos.

Frosting: descargas de baja potencia provocan pequeñas picaduras y con el paso del tiempo empiezan a generar una superficie erosionada en rodamientos.

Pitting: descargas eléctricas de alta tensión pueden provocar la formación de pequeñas aberturas o cráteres en la superficie de rodamientos.

Resistencia dieléctrica: característica de un material aislante para resistir la aplicación de un campo eléctrico sin que se produzca una descarga o conducción eléctrica.

Welding: cuando las superficies de rodamientos son expuestas a corrientes eléctricas extremas se puede generar el fenómeno de soldadura.

R E F E R E N C I A S

Busse D, Erdman J, Kerkman R *et al*. (1997). Characteristics of shaft voltage and bearing currents. *IEEE Industry Applications Magazine* 3(6):21-32.

Farfán-Cabrera L (2019). Tribology of electric vehicles: A review of critical components, current state and future improvement trends. *Tribology International* 138:473-486.

Hadden T, Jiang JW, Bilgin B *et al*. (2016). A Review of Shaft Voltages and Bearing Currents in EV and HEV Motors. *IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 1578-1583.

He F, Xie G and Luo J (2020). Electrical bearing failures in electric vehicles. *Friction* 8(1):4-28.

Rajab A, Sulaeman A, Sudirham S and Harjo S (2011). A Comparison of Dielectric Properties of Palm Oil with Mineral and Synthetic Types Insulating Liquid under Temperature Variation. *ITB Journal of Engineering Science* 43(3):191-208.

Ramesh and Lenin (2019). High Power Density Electrical Machines for Electric Vehicles-Comprehensive Review Based on Material Technology. *IEEE Transactions on Magnetics* 55:1-21.

Singh and Ahmed Saleh Al Kazzaz (2003). Induction machine drive condition monitoring and diagnostic research-a survey. *Electric Power Systems Research* 64(2):145-158.

Spikes H (2020). Triboelectrochemistry: Influence of Applied Electrical Potentials on Friction and Wear of Lubricated Contacts. *Tribology Letters* 68(3).

Kumar S, Prakash Bharti O, Varshney L, Saket RK and Vishwakarma DN (2019). Probabilistic evaluation and design aspects for reliability enhancement of induction motor. *International Journal of Reliability and Safety* 13(4):267.

Wu J, Liang J, Ruan J, *et al*. (2018). Efficiency comparison of electric vehicles powertrains with dual motor and single motor input. *Mechanism and Machine Theory* 128:569-585.

Julio A. Cao-Romero-Gallegos
Leonardo I. Farfán-Cabrera
Escuela de Ingeniería y Ciencias
Tecnológico de Monterrey campus Monterrey
A01327704@tec.mx

© **Raúl Chiquito**. *Agujero de maíz*. Extrayendo mazorcas del cencal.