

Evaluación del consumo energético de un vehículo eléctrico en la ciudad de Bogotá

Evaluation of the energy consumption of an electric vehicle in the city of Bogotá

SEBASTIÁN TORRES FRANCO¹ - MÓNICA MARCELA SUÁREZ PRADILLA² -
IVÁN CAMILO DURÁN TOVAR³ - AGUSTÍN RAFAEL MARULANDA GUERRA⁴

1. Magíster en Ingeniería Eléctrica, profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
2. Doctora en Gestión y Valoración Urbana, profesora asistente del programa de Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
3. Doctor en Ingeniería Eléctrica, profesor asistente del programa de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
4. Doctor en Ingeniería Eléctrica, profesor asociado del programa de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

sebastian.torres@escuelaing.edu.co - monica.suarez@escuelaing.edu.co - ivan.duran@escuelaing.edu.co -
agustin.marulanda@escuelaing.edu.co

Recibido: 03/04/2020 Aceptado: 27/06/2020

Disponibile en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

El crecimiento de la flota de vehículos eléctricos (EV, por su sigla en inglés) en el espacio urbano es un desafío para los planificadores de ciudad y transporte. Particularmente, caracterizar los desplazamientos en función de la duración de la carga del vehículo requiere evaluar los hábitos de conducción de los usuarios y las condiciones de tránsito local que puedan afectar el consumo energético.

Con el objetivo de contribuir a la caracterización del consumo energético de EV en el contexto local, a lo largo de este artículo se presenta la implementación de un modelo de consumo energético considerando el comportamiento del tránsito en una autopista en la ciudad de Bogotá, D.C.

Para la implementación del modelo se hicieron mediciones instantáneas de perfiles de velocidad, aceleración y ángulos de inclinación mediante aplicativos GPS, en un periodo de una semana. Los resultados indican que, en las condiciones de tránsito normal en las rutas de estudio, el consumo energético de los EV puede superar sustancialmente el consumo promedio especificado para los vehículos. Sin embargo, las condiciones operativas de este tipo de vehículos aportan grandes beneficios ambientales y su consumo energético es muy bajo en situaciones de congestión vehicular.

Palabras claves: vehículos eléctricos, estado de carga, freno regenerativo, modelo de consumo energético.

Abstract

The growth of the electric vehicle (EV) fleet at the urban level is a challenge for city and transportation planners. Characterizing trips in terms of vehicle charging duration requires assessing users' driving habits and local traffic conditions that may affect energy consumption. With the objective of contributing to the characterization of EV energy consumption in the local context, this article presents the implementation of an energy consumption model considering the traffic behavior on a highway in the city of Bogotá, D.C.

For the implementation of the model, instantaneous measurements of speed profiles, acceleration and slopes' angles were made using GPS applications over a period of one week. The results indicate that, under normal traffic conditions on the study routes, the energy consumption of EV can substantially exceed the average consumption specified for vehicles. However, the operating conditions of this type of vehicles provide great environmental benefits and their energy consumption is very low under traffic congestion.

Keywords: electric vehicles, state of charge, regenerative brake, energy consumption model.

INTRODUCCIÓN

El constante esfuerzo mundial por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero ha llevado a un mayor aprovechamiento de las energías renovables no convencionales y a lograr avances en el desarrollo de tecnologías sostenibles.

Los modos de transporte representan la segunda fuente de emisión de gases de efecto invernadero en el mundo, ya que generan cerca de 8,08 Gton de CO₂ y otros contaminantes, anualmente (IEA, 2020a). Así, las nuevas tendencias energéticas sitúan al vehículo eléctrico como una herramienta eficaz para empezar a controlar las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuir a mitigar el cambio climático.

Actualmente, hay cerca de cinco millones de unidades de vehículos eléctricos (EV, por su sigla en inglés) a escala mundial (IEA, 2020b) y se espera que la flota se incremente en los próximos años. Los factores que inciden en el crecimiento de la actual flota son de tipo ambiental, económico (relacionados con su mantenimiento) y de desempeño (aquellos que están en función de la eficiencia del motor), especialmente.

De acuerdo con Yong, Ramachandaramurthy, Tan, Mithulanathan (2015), el vehículo eléctrico supera al tradicional vehículo de combustible en situaciones de alta congestión de tráfico y, por lo tanto, es más sostenible. En Colombia, el censo de EV del año 2020 muestra que existen 2521 unidades, que corresponden a un incremento del 80,6 % respecto al año 2019, de los cuales un 30 % son vehículos enchufables (Vera & Marulanda, 2019; Andemos, 2020).

Desde otra perspectiva, la adopción de EV ha abierto nuevas oportunidades de mercado y posibilidades tecnológicas, al tiempo que ha generado grandes retos comerciales, de ingeniería y de políticas de regulación. Las investigaciones que se han desarrollado en este campo están enfocadas en identificar los efectos sobre las redes eléctricas, la localización óptima de infraestructura pública de carga y la optimización de la energía de su batería con fines de venta (Xiao, Huimei, Chen & Hongjun, 2014; Yong et al., 2015).

No obstante, para lograr una integración completa de EV en los diferentes niveles de la infraestructura económica y tecnológica a escala mundial, es necesario caracterizar el comportamiento de los usuarios en materia del consumo energético y el comportamiento de carga. Esto se debe principalmente a que los EV utilizan

cargadores que se pueden instalar en redes eléctricas de baja y media tensión, lo cual desagrega la demanda centralizada de las estaciones de combustible convencionales, y permite que los EV se puedan recargar en residencias domésticas, centros comerciales o instalaciones empresariales. De esta manera, en un escenario ideal, los usuarios de EV pueden cargar sus vehículos cuando y donde quieran (Quirós-Tortós, Ochoa & Lees, 2015; Dang, 2018).

Esta situación genera incertidumbre respecto a las franjas horarias de conexión de los vehículos, el tiempo de carga y las ubicaciones urbanas de mayor demanda. Las investigaciones realizadas muestran que para caracterizar el comportamiento de los usuarios se deben utilizar modelos de tipo estocástico o probabilístico. En la actualidad, un número significativo de estudios se ha concentrado en el desarrollo de metodologías y modelos que puedan representar este comportamiento. Mediante estos trabajos, se ha identificado que el estado de carga de la batería (SoC, por su sigla en inglés, que se expresa como porcentaje de la capacidad de la batería) y el consumo energético causado por la utilización del vehículo son aspectos fundamentales que hay que tener en cuenta al momento de modelar la interacción de los EV con las redes eléctricas y el comportamiento de los usuarios.

Considerando que el comportamiento puede variar, dependiendo del país, las condiciones climáticas, el parque automotor, o incluso de factores culturales, los resultados no se pueden generalizar. Sin embargo, las técnicas de modelación empleadas en los casos de estudio se pueden reproducir utilizando las características locales de las regiones particulares para obtener resultados realistas (Quirós-Tortós et al., 2015; (Wang, Wang, Qiu, Chu & Gadh, 2018).

Existen varios modelos para evaluar el consumo energético de un EV. Por ejemplo, los modelos de base probabilística evalúan el comportamiento de un volumen considerable de EV, para modelar sus parámetros aleatorios mediante *funciones de densidad de probabilidad* (Quirós-Tortós et al., 2015; Mendoza, Quintero, Santamaría & Alarcón, 2016).

Otros estudios dedicados a estimar el impacto de los cargadores sobre la red eléctrica utilizan un modelo simplificado, en el que se describe como una relación lineal el rendimiento promedio de la batería de consumo del vehículo (Rezaee, Farjah & Khorramdel, 2013). Por

otro lado, los modelos basados en el cálculo de potencias mecánicas y eléctricas utilizan las especificaciones técnicas del vehículo, junto a mediciones de su desempeño mecánico y eléctrico para calcular el consumo energético de la batería, en función de la velocidad y la aceleración (Tanaka, Ashida & Minami, 2008; Fiori, Ahn & Rakha, 2016; Fiori & Marzano, 2018).

Con el objetivo de aportar al entendimiento del comportamiento estocástico de los EV en el contexto local, en este artículo se presenta un estudio del consumo energético de un vehículo eléctrico en condiciones de tránsito normal en una autopista de la ciudad de Bogotá, D.C. Se aplica un modelo de consumo de potencia eléctrica, el cual utiliza mediciones instantáneas de velocidad y aceleración. Las mediciones se hacen durante distintas franjas horarias y en diversos sentidos de la vía, con la intención de verificar cómo estos factores pueden afectar el consumo del vehículo.

El contenido restante del artículo se estructura de la siguiente manera: primero se presenta la metodología de trabajo para la evaluación del consumo energético, posteriormente se analiza el caso de estudio, luego se describen los resultados y, finalmente, se dan las conclusiones y se discuten los aportes hechos.

METODOLOGÍA

En este trabajo se ha adoptado el enfoque de los modelos basados en el cálculo de potencias, debido a que proporcionan resultados confiables sin la necesidad de una población de pruebas compuesta por EV. La metodología general de estos modelos se ilustra más adelante (figura 1).

La finalidad de la metodología consiste en calcular el consumo de energía eléctrica (E) de la batería a partir del consumo mecánico de potencia (P_m) ocasionado por el movimiento del vehículo. Para esto, primero se identifica el vehículo que se va a utilizar y se obtienen las especificaciones correspondientes para conocer cómo varía su consumo energético, en función del peso, la eficiencia del motor, la eficiencia de la batería, etc.

Posteriormente, se calcula la potencia instantánea mecánica desarrollada por el motor eléctrico del EV, para lo cual es necesario disponer de los perfiles de velocidad con respecto al tiempo, $v(t)$, y aceleración con respecto al tiempo, $a(t)$, en todo el recorrido del vehículo. Esta potencia mecánica se debe convertir a

su equivalente en potencia eléctrica para determinar la energía demandada de la batería del vehículo, proceso que se puede llevar a cabo mediante técnicas rigurosas, como el cálculo de la demanda de corriente por parte del motor, o mediante el uso de eficiencias promedio.

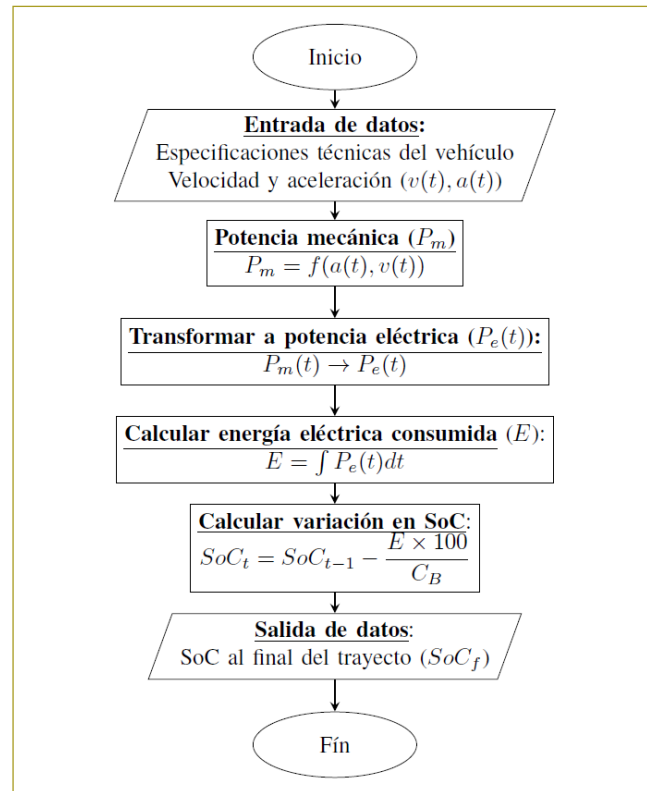


Figura 1. Metodología general de modelos de consumo de potencia.

Finalmente, se calcula la demanda energética (E) integrando la demanda de potencia eléctrica en intervalos de tiempo para calcular la variación en el SoC de la batería. Es importante señalar que esta variación no depende únicamente de las características físicas del vehículo, sino también de la capacidad energética de la batería; de esta manera, baterías con capacidades energéticas más altas experimentarán menores variaciones en su estado de carga.

CASO DE ESTUDIO

A continuación, se describe la implementación del modelo de consumo de potencia utilizado, la selección de rutas tomadas como objetivo de estudio y, finalmente, el proceso de medición llevado a cabo para la caracte-

rización de los perfiles de velocidad y aceleración en condiciones reales de tráfico.

1. Implementación del modelo de consumo

En este artículo se ha implementado el modelo presentado en Fiori et al. (2016), en el cual no solo se considera la variación negativa del SoC por el desplazamiento del vehículo, sino que también incluye las variaciones positivas que resultan del uso del freno regenerativo.

Por otro lado, en el modelo se consideran cuatro eficiencias principales dentro del vehículo: la eficiencia del eje de transmisión, la eficiencia del motor, la eficiencia del freno regenerativo y, finalmente, la eficiencia de las baterías, presentando estos rendimientos como factores constantes. De acuerdo con lo anterior, para calcular la demanda energética de la batería se requiere partir de la caracterización de la potencia que el EV desarrolla por su movimiento, y escalar de forma lineal este valor utilizando las eficiencias que intervienen en la transmisión energética de las baterías a las llantas del vehículo, proceso que se esquematiza a renglón seguido (figura 2).

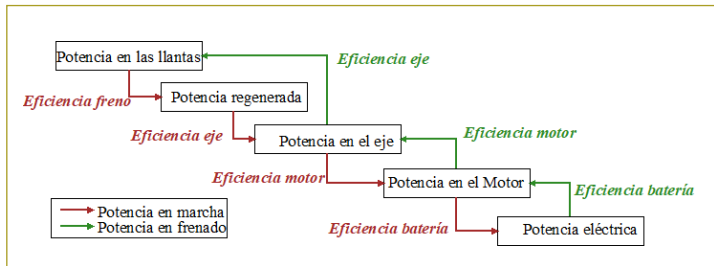


Figura 2. Flujos de potencia durante frenado y marcha del EV.

Nótese que para aquellos momentos en los cuales se emplee el freno regenerativo, la potencia eléctrica tendrá un valor negativo y se verá afectada por la eficiencia del freno.

De las potencias anteriores, la potencia en las llantas del EV (P_w) se puede calcular mediante la ecuación (1).

$$P_w = (m \cdot a(t) + m \cdot g \cdot \cos(\theta)) \cdot \frac{C_r}{1000} (c_1 v(t) + c_2) + \frac{1}{2} \rho_{\text{aire}} \cdot A_f \cdot C_D v^2(t) + m \cdot g \cdot \sin(\theta)) \cdot v(t) \quad (1)$$

Donde m es la masa total del vehículo y los pasajeros medida en $[kg]$, $a(t)$ es la aceleración del vehículo en el instante t , medida en $[m/s^2]$. La inclinación de la vía se representa por θ . Las constantes C_r , c_1 y c_2 están asociadas a la resistencia de la superficie del terreno y del material de las llantas. La velocidad instantánea del vehículo corresponde a la expresión $v(t)$, medida en $[m/s]$; la densidad del aire a la altura de estudio se indica por ρ_{aire} , medida en $[kg/m^3]$; A_f corresponde al área frontal del vehículo, medida en $[m^2]$; g es la gravedad medida en $[m/s^2]$ y, finalmente, C_D es el coeficiente de arrastre del vehículo.

Una vez calculada la potencia desarrollada en las llantas del vehículo se puede determinar la potencia mecánica demandada por éste, usando las eficiencias del eje de transmisión y la eficiencia eléctrica del motor, como se muestra a continuación (2).

$$P_m = \frac{P_w}{\eta_t \cdot \eta_m} \quad (2)$$

Donde η_t es la eficiencia del eje de transmisión y η_m es la eficiencia eléctrica del motor.

Finalmente, es posible determinar la potencia eléctrica demandada de la batería (P_e) a partir de la eficiencia del sistema de almacenamiento mediante la ecuación (3). Como se mencionó con anterioridad, durante el uso del freno regenerativo el sentido del flujo de energía es inverso y se ve afectado por la eficiencia del freno regenerativo.

$$P_e(t) = \begin{cases} \frac{P_m}{\eta_B} & \text{si } a(t) > 0 \\ \frac{P_m}{\eta_F \cdot \eta_B} & \text{si } a(t) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Donde η_B es la eficiencia de la batería del vehículo y η_F es la eficiencia del freno regenerativo, que se puede obtener mediante la ecuación (4).

$$\eta_F = \begin{cases} \left(e^{\frac{\alpha}{|a(t)|}} \right) & \text{si } a(t) < 0 \\ 0 & \text{si } a(t) > 0 \end{cases} \quad (4)$$

Finalmente, se calcula la variación en el SoC a partir de la siguiente ecuación:

$$SoC_t = SoC_{t-1} - \frac{P_{cons}}{3600 \cdot C_B} \quad (5)$$

También es posible averiguar el consumo promedio del vehículo para las rutas estudiadas, relacionando su consumo energético con la distancia (6).

$$CE = \frac{\sum_{t=t_0}^{t=t_f} P_c(t) \cdot \Delta t}{3600 \cdot d} \quad (6)$$

Donde CE es el consumo energético del vehículo medido en $[Wh/km]$, y d es la distancia recorrida en kilómetros durante el intervalo de tiempo.

El vehículo tomado como sujeto de estudio en este artículo es el Nissan Leaf 2015, para el cual se sugieren los valores de constantes empíricas que se muestran más adelante (tabla 1) (De Gennaro, Paffumi, Martini, Manfredi, Vianelli, Ortenzi & Genovese, 2015; Fiori et al., 2016).

Tabla 1

Valores de coeficientes para el caso de estudio

Coefficientes	Valor	Coefficientes	Valor
m [kg]	1640	η_{eje}	0,92
C_r	1,75	η_{me}	0,91
c_1	0,0328	η_{bat}	0,90
c_2	4,575	C_{bat} [kWh]	24,0
A_f	2,3316	α	0,411
C_0	0,28		

Adicionalmente, se consideró un consumo fijo asociado a sistemas auxiliares de $700 W$ por el consumo de sistemas auxiliares del vehículo.

2. Rutas de prueba y perfiles de velocidad y aceleración

El modelo se aplicó en condiciones de tránsito de un día normal de la ciudad de Bogotá, D.C., entre los puntos **A** y **B**, cursando trayectos que mezclan varias avenidas principales de la ciudad, en los cuales se midieron la ve-

locidad y la aceleración instantánea con una resolución de un segundo mediante la aplicación GPS Speed Pro durante un periodo de una semana (figura 3).

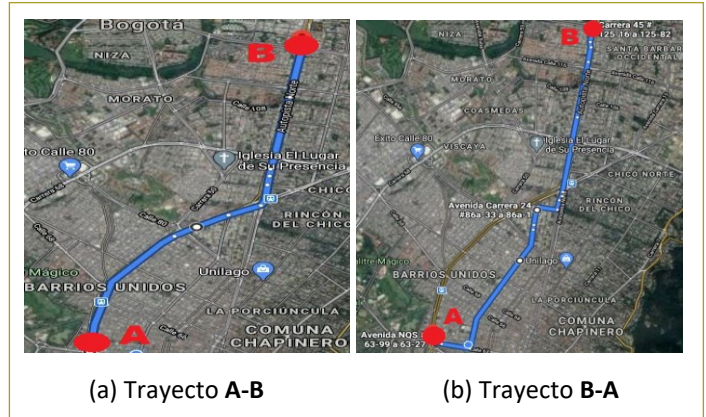


Figura 3. Trayectos de prueba seleccionados.

Los trayectos **A-B** se evaluaron entre las 7:00 y las 8:00 a.m., mientras que los trayectos de **B-A** se evaluaron entre las 5:00 y las 6:00 p.m. A continuación, se muestra el perfil de velocidad de las rutas para una de las mediciones realizadas (figura 4).

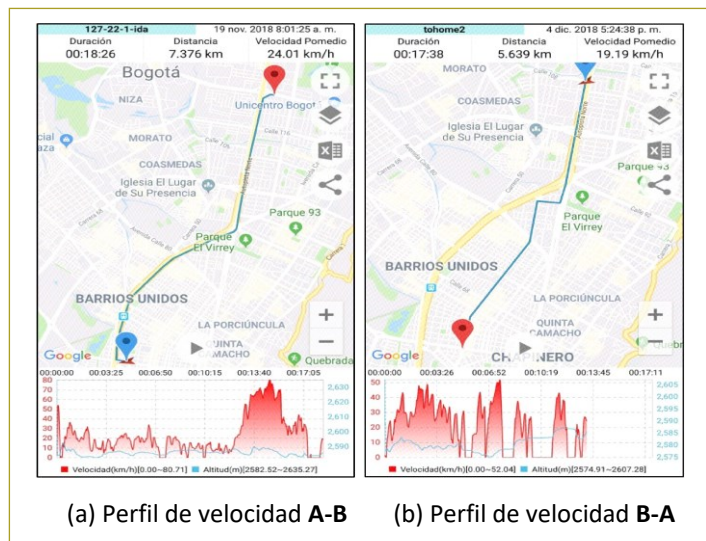


Figura 4. Perfiles de velocidad en las rutas de prueba.

RESULTADOS

En la figura siguiente se presentan el comportamiento del SoC y la velocidad del EV con respecto al tiempo, una vez implementado el modelo ya descrito para un grupo de mediciones de cada una de las rutas de prueba

(figura 5). Nótese que la variación del SoC de la batería al final del trayecto está aproximadamente en el rango de un 4 % de la capacidad de la batería, y que, a diferencia de los vehículos tradicionales de gasolina, los EV mantienen un consumo muy bajo de energía durante los periodos de baja velocidad. También es posible apreciar cómo el máximo consumo energético se produce en las condiciones de mayor velocidad, y que las situaciones de frenado más bruscas generan un mayor efecto regenerativo sobre la energía del vehículo.

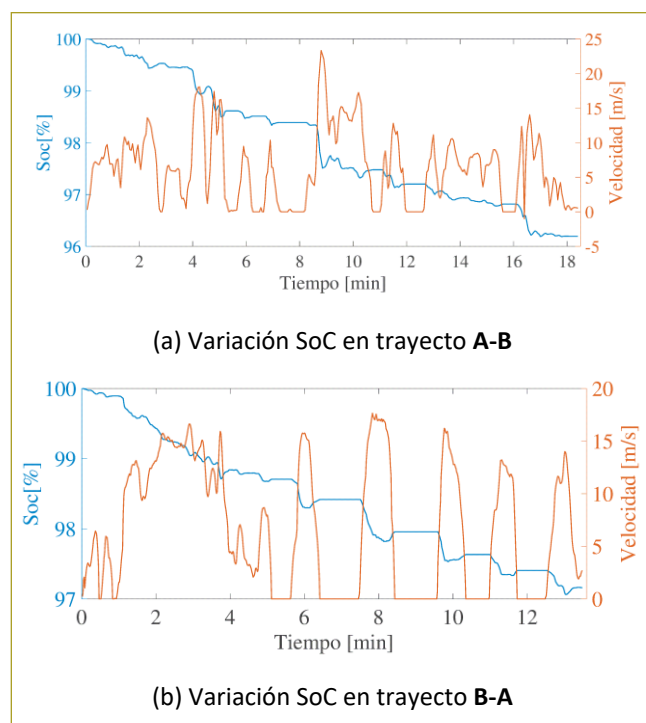


Figura 5. Variación del SoC en las rutas de pruebas.

Por otra parte, se ilustra la demanda de potencia activa para las anteriores rutas de estudio, en la que es posible notar cómo la demanda de potencia sigue un patrón casi idéntico, presentado por el de la aceleración (figura 6). Esto se debe principalmente a que los picos de demanda no se producen por situaciones de velocidad constante, sino cuando hay una condición de alto par.

Seguidamente, se presenta un resumen de los estadísticos obtenidos sobre la variación del SoC y el consumo energético del vehículo (tabla 2).

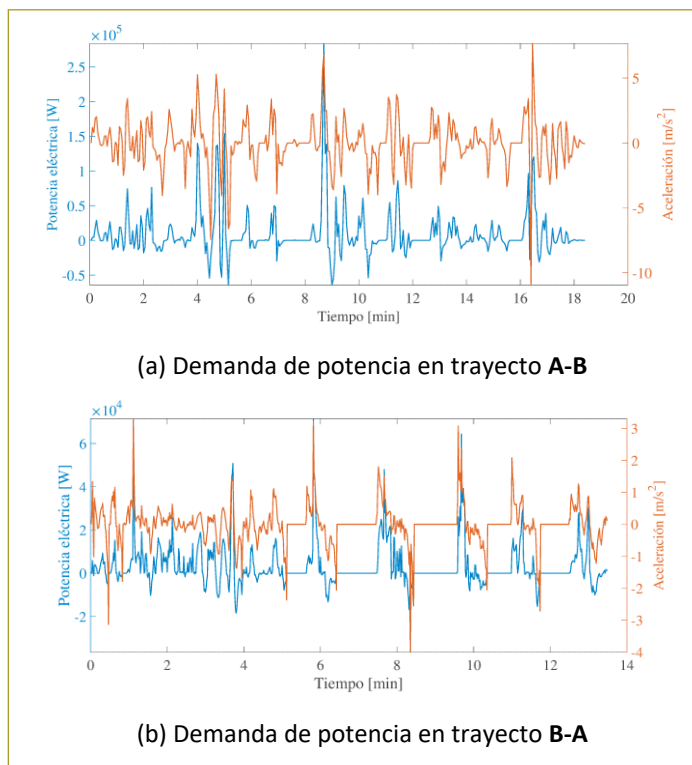


Figura 6. Demanda de potencia en las rutas de estudio.

Tabla 2

Resultados del modelo de consumo para el caso de estudio

Parámetro	Trayecto A-B	Trayecto B-A
Distancia [km]	7,37	5,64
Velocidad promedio ida [km/h]	20,3	25
Duración promedio del viaje [min]	20	19
Consumo promedio energético [Wh/]	188,89	183
Consumo mínimo energético [Wh/]	166	175
Consumo máximo energético [Wh/]	205	191
Variación promedio SoC [%]	-4,9	-5,6
Variación mínima SoC [%]	-4,3	-5,4
Variación máxima SoC [%]	-5,3	-5,9

Al comparar los resultados obtenidos con el consumo promedio nominal del EV de $165 [Wh/km]$, se encuentra que en las condiciones de tránsito local el consumo se incrementa en promedio un 20 %, lo cual indica que el número de posibles trayectos que el usuario puede recorrer disminuirá en este mismo valor.

CONCLUSIONES

Se implementó un modelo de consumo energético basado en el cálculo de potencias mecánicas y eléctricas para caracterizar la variación en el estado de carga de la batería de un EV en condiciones de tránsito en una autopista en Bogotá, D.C. Los resultados demuestran que con los perfiles de velocidad y aceleración locales el consumo energético promedio del EV tiende a ser sustancialmente más elevado que el indicado en fábrica.

Los resultados del caso de estudio señalan, de acuerdo con la variación promedio del estado de carga, que la capacidad de la batería tomada como parte del estudio es capaz de cubrir aproximadamente ocho trayectos de ida y vuelta antes de descargarse al 20 % de la capacidad de la batería.

Las condiciones de tránsito local pueden afectar sustancialmente el rendimiento nominal de un EV. Mientras que las condiciones más altas de velocidad generan el mayor consumo energético, los frenados más bruscos generan un efecto más cuantioso sobre la regeneración de energía. Por otro lado, a diferencia de los vehículos tradicionales de gasolina, situaciones de baja velocidad o estacionamiento no tienen un efecto significativo sobre el consumo de energía.

REFERENCIAS

- Asociación Nacional de Movilidad Sostenible (Andemos) (2020). *Informes híbridos y eléctricos 2020-2028*. Tomado de <https://www.andemos.org/index.php/2020/09/09/agosto-8/>.
- Dang, Q. (2018). *Electric vehicle (EV) charging management and relieve impacts in grids*. 9th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 1-5. DOI 10.1109/PEDG.2018.8447802.
- De Gennaro, M., Paffumi, E., Martini, G., Manfredi, U., Vianelli, S., Ortenzi, F. & Genovese, A. (2015). Experimental test campaign on a battery electric vehicle: laboratory test results (part 1). *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 4 (1), 1-16. DOI 10.4271/2015-01-1167.
- Fiori, C., Ahn, K. & Rakha, H. A. (2016). Power-based electric vehicle energy consumption model: model development and validation. *Applied Energy*, 168, 257-268. DOI 10.1016/j.apenergy.2016.01.097.
- Fiori, C. & Marzano, V. (2018). *Modelling energy consumption of electric freight vehicles in urban pickup/delivery operations: analysis and estimation on a real-world dataset*. *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*. 65, 658-673. DOI 10.1016/j.trd.2018.09.020.
- International Energy Agency (IEA) (2020a). *CO₂ emissions from fuel combustion*. Tomado de <https://www.iea.org/subscribe-to-data-services/co2-emissions-statistics>.
- International Energy Agency (IEA) (2020b). *Global EV Outlook*. Tomado de <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>.
- Mendoza, C. C., Quintero, A. M., Santamaría, F. & Alarcón, J. A. (2016). Estimation of electric energy required by electric vehicles based on travelled distances in a residential zone. *Tecciencia*, 11(21), DOI 10.18180/tecciencia.2016.21.4.
- Quirós-Tortós, J., Ochoa, L. F. & Lees, B. (2015). *A statistical analysis of EV charging behavior in the UK*. 2015 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT Latam), 445-449. DOI 10.1109/ISGT-LA.2015.7381196.
- Rezaee, S., Farjah, E. & Khorramdel, B. (2013). Probabilistic analysis of plugin electric vehicles impact on electrical grid through homes and parking lots. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4, 1024-1033. DOI 10.1109/TSTE.2013.2264498.
- Tanaka, D., Ashida, T. & Minami, S. (2008). An analytical method of EV velocity profile determination from the power consumption of electric vehicles. *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1-3. DOI 10.1109/VPPC.2008.4677742.
- Vera, C. D. y Marulanda, A. R. (2019). *Retos de los vehículos eléctricos en Colombia*. Revista CIDET, Vol. 21, pp. 69-76. Tomado de: <http://revista.cidet.org.co/revistas/revista-21/retos-de-los-vehiculos-electricos-en-colombia/>
- Wang, B., Wang, Y., Qiu, C., Chu, C., y Gadh, R. (2015). *Event-based electric vehicle scheduling considering random user behaviors*. 2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGrid-Comm). pp. 313-318. DOI 10.1109/SmartGridComm.2015.7436319.
- Xiao, H., Huimei, Y., Chen, W. y Hongjun, L., (2014), *A survey of influence of electric vehicle charging on power grid*. 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. pp. 121-126. DOI 10.1109/ICIEA.2014.6931143.
- Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M. & Mithulananthan, N. (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle. *Renewable and Sustainable Energy*, 49, 365-385. DOI 10.1016/j.rser.2015.04.130.