



Algoritmo de gestión para la recarga de vehículos eléctricos

Management algorithm for electric vehicles recharging

C. C. Mendoza¹, A. M. Quintero², J. A. Alarcón

Fecha de recepción: Agosto 28 de 2015

Fecha de aceptación: Septiembre 25 de 2015

Como citar: Mendoza, C., Quintero, A., & Alarcón, J. (2015). Algoritmo de gestión para la recarga de vehículos eléctricos. *Revista Tecnura*, 19 (CITIE), 90-98. doi: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.ICE.a11>

Resumen

Este artículo presenta un esquema de gestión para la recarga de vehículos eléctricos, considerando que la penetración masiva de estos puede generar efectos negativos en las redes de distribución, comprometiendo la confiabilidad, calidad y seguridad del sistema. Con el algoritmo propuesto, el operador de red se beneficia al evitar la sobrecarga del circuito de distribución, reducir las pérdidas de potencia y mejorar el perfil de tensión. El modelo planteado asigna una carga inicial a cada vehículo siguiendo una función de probabilidad que representa la energía requerida según los patrones de movilidad de la ciudad, la capacidad de la batería y el consumo. Finalmente, se comprueba la efectividad del esquema de gestión propuesto analizando un caso de estudio para la ciudad de Bogotá.

Palabras Claves: Algoritmo de gestión, batería, curva de carga, función de probabilidad, pérdidas de potencia, perfil de tensión, recarga, vehículo eléctrico (VE).

Abstract

This article presents a management scheme for electric vehicle charging, considering the massive penetration of these can cause negative effects on distribution networks, compromising the reliability, quality and security of system. With the proposed algorithm, the network operator will benefit by avoiding the overload of distribution circuit, minimizing the power losses and improving the voltage profile. The proposed model assigns an initial charge for each vehicle following a probability function that represents the required energy based on mobility patterns of the city, the capacity and discharged energy of battery. Finally, we verified the effectiveness of the proposed management scheme to analyzing a study case for the city of Bogotá.

Keywords: Management algorithm, battery, load curve, probability function, power losses, voltage profile, charging, electric vehicle (EV).

¹ Ingeniero Eléctrico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá. Ingeniero de Proyectos de Líneas de Alta Tensión. Contacto: cmendozag@correo.udistrital.edu.co

² Ingeniera Eléctrica y Tecnóloga en Telecomunicaciones, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia. Contacto: amquinterom@correo.udistrital.edu.co

³ B.Sc. y M.Sc. en Ingeniería. Especialista en alta tensión, compatibilidad electromagnética. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia. Contacto: jaalarconv@udistrital.edu.co

INTRODUCCIÓN

El vehículo eléctrico actualmente es parte de una política de transporte sostenible y eficiente que busca disminuir el consumo de combustibles fósiles. Por esto, los vehículos eléctricos en Colombia, están contemplados en el Plan Nacional de Desarrollo (PND) para el periodo presidencial 2014-2018 (Departamento Nacional de Planeación, 2014). En este plan, el Ministerio de Minas y Energía y la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), dentro de sus alcances y objetivos, implementan el Programa Nacional de Uso Racional de Energía (PROURE), estableciendo prioridades en cuanto a sostenibilidad ambiental, consumo de energéticos y uso racional de la energía (Prias Caicedo, 2010). Según este programa, el sector transporte consume el 38% de la energía primaria del país y para el año 2030 aumentará en más de dos veces su demanda de energía. Este consumo corresponde principalmente a diesel y es responsable del 21% de la emisiones de CO₂ del país (Departamento Nacional de Planeación, 2014). Con la inclusión de los vehículos eléctricos "VE" se tendría un aprovechamiento de la generación hidráulica, que abarca más del 70% (Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2010), y ayudaría a reducir el consumo de combustibles fósiles.

Dado lo anterior y considerando un escenario de penetración masiva de VE en Bogotá, se prevén problemas en los niveles de tensión y la capacidad del sistema, que incrementan las pérdidas de potencia al igual que los costos de operación y mantenimiento de la red de distribución. El algoritmo de gestión permite reducir los problemas indicados al igual que los costos por reparación de la infraestructura generados por sobrecarga o fallas técnicas.

ANTECEDENTES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La inclusión de los VE en las redes de distribución requiere evaluar diferentes métodos para gestionar

la energía y evitar fallas en el sistema. Por tal razón, algunos investigadores han propuesto sistemas de gestión inteligentes basado en una infraestructura de comunicación, que recibe y emite las órdenes de despacho de energía para los vehículos eléctricos (Gharbaoui, y otros, 2012)(Wickert, Baier, Lichtner, & Prior, 2010). Además incluyen el concepto de "selección de carga", que maximiza la conveniencia del usuario mientras mantiene los límites de operación del sistema (Wen, Chen, Teng, & Ting, 2012).

Sin embargo, algunas investigaciones omiten las restricciones del sistema y trabajan con segmentos de red homogéneos (Flath, Gottwalt, & Ilg, 2012)(Masoum, Deilami, Moses, Masoum, & Abu-Siada, 2011), lo cual difiere de la realidad, pues la longitud de los conductores, la tensión y las pérdidas eléctricas varían según la ubicación del usuario.

Este artículo propone una estrategia de gestión para la recarga simultánea de vehículos eléctricos mediante un algoritmo de selección que coordina las recargas en función de la sensibilidad generada en cada nodo, cada hora del día, dando prioridad para la conexión en la siguiente hora de despacho a los usuarios que han sido aplazados en la hora inmediatamente anterior. La estrategia permite controlar los puntos, períodos y frecuencia de carga de los PEV (Vehículo Eléctrico Enchufable), reduciendo los problemas de Planeación de la Expansión de la Infraestructura Eléctrica generados por la alta incertidumbre de la demanda (Pieltain, Gómez, Cossent, Domingo, & Frías, 2011).

CARACTERIZACIÓN DEL CONSUMO DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

El modelo planteado se asigna una cantidad de vehículos eléctricos a conectarse hora a hora, así como un valor de capacidad de la batería, energía consumida y número de conexiones al día para cada uno, siguiendo funciones de probabilidad que representan cada uno de estos aspectos (Figura 1).

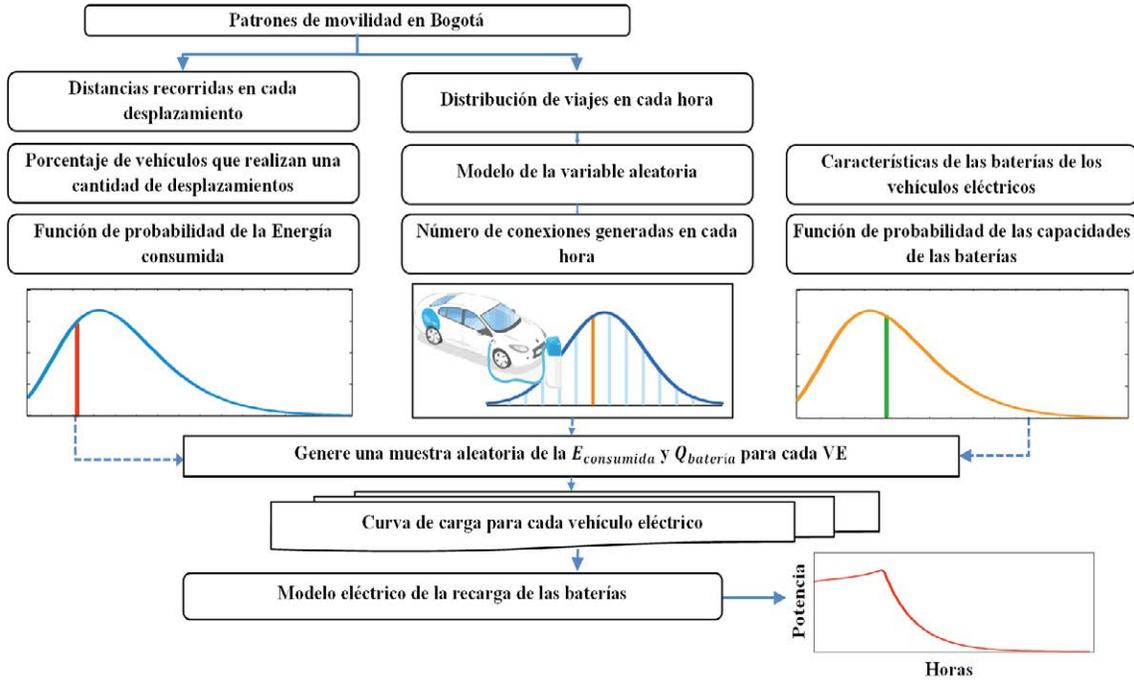


Figura 1. Esquema general de la metodología utilizada en la investigación para caracterizar el consumo del vehículo eléctrico.

Para describir el comportamiento de la batería se usó el modelo de tensión (1) y corriente (2) propuestas por Tremblay (Tremblay & Dessaint, 2009), que permiten modificar sus parámetros según la

capacidad de la batería, obteniendo diferentes curvas de consumo que varían según la capacidad y la distancia recorrida (energía consumida).

$$E = \begin{cases} E_0 - 0.7K \frac{Q_{bat}}{it+0.1 \left(\frac{Q_0}{Q_{bat}100}\right)} + Ae^{-B \left(\left(\frac{Q_{bat}}{100}\right) + it\right) - 0.7BQ_{bat}} & si \left[\frac{it+Q_0}{Q_{bat}} \right] < 0.7 \\ E_0 - K + A & si \left[\frac{it+Q_0}{Q_{bat}} \right] \geq 0.7 \end{cases} \quad (1)$$

$$I_{carga} = \begin{cases} \left(V_{carga} Q_{bat} \right) e^{\left(\frac{E * Q_{bat} * V_{carga}}{0.3 * Q_{bat}} \right) * \left(-t + \frac{0.7}{V_{carga}} \frac{Q_0}{V_{carga} * 100} \right)} & si \left[\frac{it+Q_0}{Q_{bat}} \right] > 0.7 \\ V_{carga} Q_{bat} & si \left[\frac{it+Q_0}{Q_{bat}} \right] \leq 0.7 \end{cases} \quad (2)$$

La función de probabilidad que representa las distancias recorridas fue obtenida a partir de los patrones de movilidad de la ciudad, los hábitos de los usuarios, la distancia total recorrida por cada vehículo, y el número de usuarios que recorren una distancia específica de acuerdo al nivel

socioeconómico (Mendoza, Quintero, Santamaria, & Alarcon, 2015).

La función de probabilidad de la energía requerida por cada VE se calcula con las distancias recorridas acumuladas ($D_{recorridas}$) y el consumo

específico promedio de las baterías (C_{bat}), de acuerdo con (3) como se presenta en la Figura 2.

$$E_{consumida}[kWh] = D_{recorridas} * C_{bat} \frac{kWh}{km} \quad (3)$$

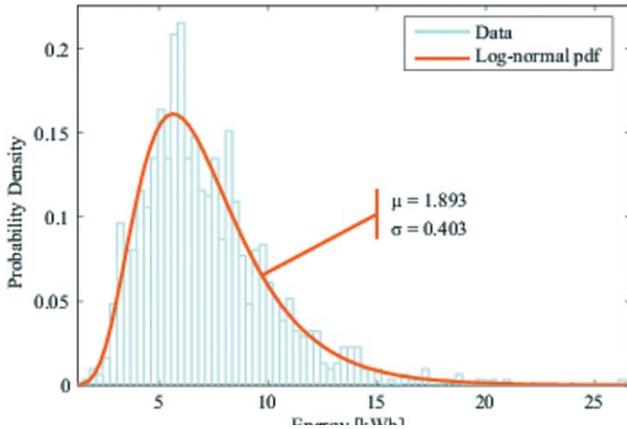


Figura 3. Función de probabilidad de la energía consumida por el vehículo eléctrico.

Fuente: autoría propia

ESQUEMA DE GESTIÓN PARA COORDINAR LA RECARGA DE LOS VE

Las recargas de los VE se gestiona para mitigar su efecto sobre la red, teniendo en cuenta las restricciones del sistema de distribución. De acuerdo con lo anterior, el algoritmo de gestión controla las condiciones de operación y recarga de los vehículos eléctricos en tiempo real, optimizando el uso de la capacidad de la red. Para esto se deben identificar y seleccionar los nodos que más contribuyen al incremento de pérdidas en el sistema.

Función Objetivo

La función objetivo usada para gestionar la demandase muestra en las ecuaciones (4) a (6) y busca minimizar las pérdidas técnicas del sistema (Deilami, Masoum, Moses, & Masoum, 2011). Las restricciones usadas corresponden a los límites de tensión y la capacidad máxima del circuito. Con

el algoritmo se logra una reducción de los costos operativos y por pérdidas con lo cual se garantiza un adecuado uso de los equipos, prolongando su vida útil. Estas reducciones hacen cada vez más viable la posibilidades para implementación de sistemas inteligentes, pues mejora las condiciones operativas para conductores y los transformadores (Ochoa & Harrison, 2011)(Masoum, Deilami, Moses, Masoum, & Abu-Siada, 2011).

$$\min P_{pérdidas,h} = \sum_{k=1}^{n-1} P_{pérdidas(k,k+1),h} \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^n S_{carga,h} < D_{max} \quad (5)$$

Sujeto a:

$$0.9p.u. \leq |V_k| \leq 1.05p.u. \quad (6)$$

Donde:

$P_{pérdidas,h}$: Pérdida total de potencia activa en el sistema en una hora específica del día.

$P_{pérdidas(k,k+1),h}$: Potencia activa de pérdidas en un ramal comprendido entre los nodos k y $k+1$, en una hora específica del sistema.

$S_{carga,h}$: Potencia aparente de la carga en cada nodo para una hora específica.

D_{max} : Demanda máxima del circuito, asignada por el transformador.

$|V_k|$: es la magnitud de la tensión en el nodo k en p.u.

n : es el número total de nodos del sistema.

En torno a este sistema de ecuaciones, el esquema de gestión debe ajustar la condición de carga dada por el flujo de potencia calculado y optimizado en cada hora, para minimizar las pérdidas cuando no se cumplen las restricciones a las cuales está sujeto.

Enfoque de Sensibilidad de Pérdidas

La sensibilidad de pérdidas permite cuantificar a través de índices, la contribución al incremento de las pérdidas de cada uno de los nodos del sistema, acorde con la condición de carga presente (Khatod, Pant, & Sharma, 2006).

El cálculo de la sensibilidad, se deriva de la matriz del Jacobiano del método de Newton-Raphson para la solución de flujos de potencia, al colocar la magnitud y ángulo de la tensión (variables de estado) en términos de las pérdidas incrementales del sistema, tal como se muestra en (7) y (8).

$$\begin{bmatrix} dP \\ dQ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$P_{\text{pérdidas}} = f(V, \theta) \quad (8)$$

Finalmente, la sensibilidad de pérdidas se calcula siguiendo la ecuación (9).

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{pérdidas}}}{\partial P_n} \\ \frac{\partial P_{\text{pérdidas}}}{\partial Q_n} \end{bmatrix} = [J^T]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{pérdidas}}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_{\text{pérdidas}}}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Donde $[J^T]^{-1}$, representa la matriz traspuesta e inversa del Jacobiano obtenido del flujo de carga en su última iteración (Peng, Shun, Zou, & Wang, 2005).

Algoritmo de Gestión

El algoritmo de gestión propuesto utiliza la selección de sensibilidades máximas para aplazar la recarga de un conjunto específico de vehículos eléctricos que contribuyen al incremento en las pérdidas del sistema, proceso que se compone de los siguientes pasos:

- Los índices de sensibilidad disminuyen en los nodos donde la recarga de vehículos eléctricos se desplaza para la siguiente hora. Bajo esta premisa, el criterio de selección puede establecer rangos de sensibilidades que disminuyen conforme la recarga de vehículos eléctricos se aplaza, lo que implica: *Elegir los nodos con el mayor índice de sensibilidad dentro un rango establecido y desplazar la recarga de vehículos eléctricos para la siguiente hora.*

- Sin embargo, al desplazar la potencia que consume un conjunto de vehículos eléctricos durante su recarga, se modificarían las condiciones de carga en el sistema de distribución, es decir: *Para una condición específica de carga en el sistema se establecen índices de sensibilidad únicos.*
- Dado que el cálculo de sensibilidades depende de la matriz del Jacobiano, al modificarse las condiciones de carga es necesario ejecutar de nuevo el flujo de potencia, luego: *Se ejecuta el flujo de carga cada vez que el deslastre de carga se da en el sistema.*

Este proceso se repite hasta que se cumplen las restricciones de la función objetivo, haciendo que los rangos de sensibilidad establecidos en cada iteración disminuyan conforme se da el deslastre selectivo de cargas en el sistema. Estos pasos se repiten hora a hora hasta lograr que se cumplan las restricciones de tensión y capacidad en cada instante de tiempo. Finalmente, luego de correr el algoritmo se obtienen una curva de carga modificada respecto a la curva sin gestión, la cual garantiza condiciones de operación adecuadas en cada uno de los nodos del sistema. Esto implica que el algoritmo ajusta la conexión y desconexión de los VE teniendo en cuenta las variaciones que se generan en la curva de demanda de potencia hasta lograr la coordinación de las recargas. La Figura 3 presenta el diagrama de flujo del algoritmo de gestión descrito.

RESULTADOS OBTENIDOS AL IMPLEMENTAR EL ALGORITMO DE GESTIÓN

Para comprobar el funcionamiento del esquema de gestión planteado, se simula un circuito de distribución perteneciente a la red eléctrica de la ciudad de Bogotá, que tiene 628 nodos, de los cuales 500 corresponden a usuarios residenciales estrato 6 (van den Bulk, 2009). La red de media tensión 11.4 kV, usa conductores ACSR 4/0 y 17 transformadores de distribución, mientras que la

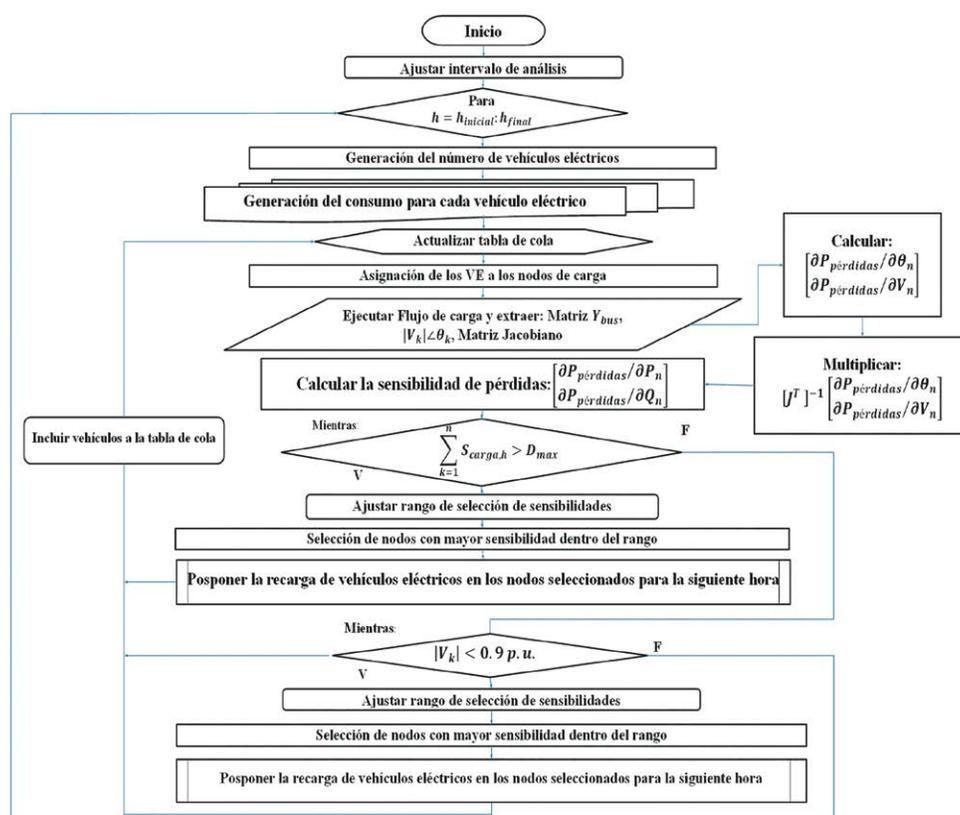


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología que emplea el algoritmo de gestión.

Fuente: elaboración propia

red de baja tensión se compone de conductores ACSR 2 y 2/0.

Las restricciones del sistema que definen los límites de operación en el algoritmo son:

- Capacidad máxima del circuito de 3.8 MVA.
- Niveles de tensión entre +5% y -10% de la tensión nominal según la norma NTC 1340.

Inicialmente se plantea un caso de estudio con una penetración de VE del 100%, en el cual se gestiona la demanda de los vehículos eléctricos durante 37 horas consecutivas, analizando el funcionamiento del sistema con y sin sistema de gestión. Los resultados muestran que la hora 18:00, la tensión cae un 3% por abajo del límite permitido cuando no hay gestión (Figura 4a), y se corrige al implementar el algoritmo de gestión (Figura 4b).

Adicionalmente, la figura 5 muestra que la curva de carga cumple los límites de operación cuando se implementa el sistema de gestión, pero produce una sobre carga cercana al 25% en el mismo circuito cuando no usa el sistema de gestión.

Las pérdidas en el circuito de distribución llegan a 170 kW cuando se conectan los VE sin ningún tipo de coordinación, y disminuyen cerca de un 40% cuando se hace la gestión. Esto se evidencia principalmente en los tramos de media tensión que concentran la demanda de los transformadores de distribución, lo que se observa en la Figura 6.

Los resultados confirman la efectividad del algoritmo, pues la cantidad de vehículos aplazados es tan solo un 7%, que es muy bajo respecto del total de los vehículos conectados.

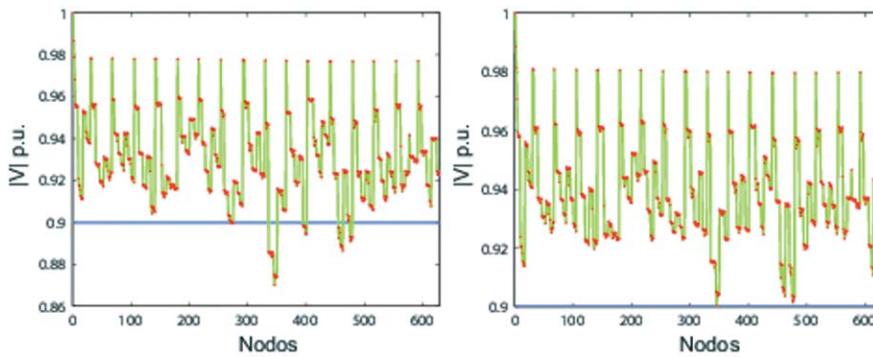


Figura 4. a. Perfil de tensión sin gestión a las 18:00 p.m. b. Perfil de tensión cuando se implementa el algoritmo de gestión a las 18:00 p.m.

Fuente: elaboración propia

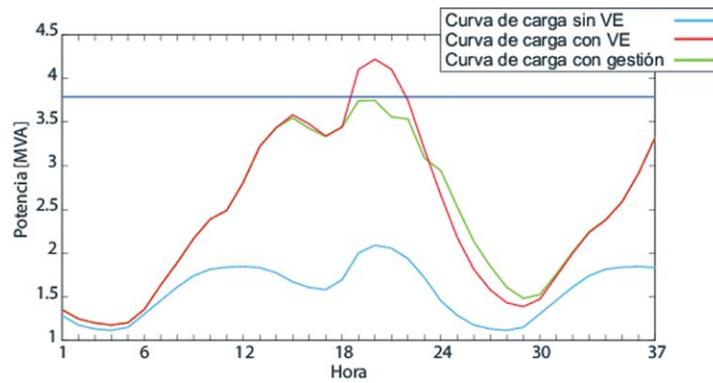


Figura 5. Gestión de la curva de carga al considerar la capacidad máxima asignada al circuito de distribución implementando el algoritmo propuesto.

Fuente: elaboración propia

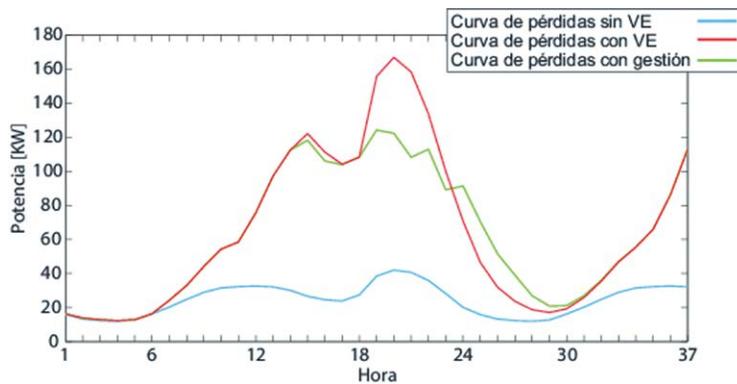


Figura 6. Comportamiento de las pérdidas de potencia totales debido a la conexión de vehículos eléctricos en cada hora y su gestión implementando el algoritmo propuesto.

Fuente: elaboración propia

CONCLUSIONES

La introducción masiva de vehículos eléctricos en un sistema de distribución residencial afecta negativamente el nivel de tensión de los nodos y la capacidad máxima asignada al circuito, con lo que se incrementan las pérdidas de potencia totales y por ende, los costos de operación y mantenimiento de los equipos.

La implementación del algoritmo de gestión propuesto en esta investigación evidencia una reducción en las pérdidas de potencia cercana al 40%, puesto que la coordinación de las recargas se hace en función de la minimización de las pérdidas en los ramales del sistema de distribución usando los índices de sensibilidad y las restricciones del sistema.

Bajo el esquema de gestión propuesto es posible deducir que la selección óptima de un pequeño conjunto de nodos para aplazar la recarga de vehículos eléctricos, mantiene los niveles de tensión y la capacidad del circuito dentro de los límites establecidos, reduciendo en la misma medida las pérdidas del sistema, de esta manera tanto el operador de red como el usuario se verán beneficiados.

FINANCIAMIENTO:

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

REFERENCIAS

- CIRCUTOR. (s.f.). Equipos y Sistemas de Gestión Inteligente para la Recarga de Vehículos Eléctricos. Barcelona, España.
- CODENSA. (2 de Diciembre de 2009). Generalidades de la Norma LA. Bogotá.
- Deilami, S., Masoum, A., Moses, P., & Masoum, M. (2011). Real-Time Coordination of Plug-In Electric Vehicle Charging in Smart Grids to Minimize Power Losses and Improve Voltage Profile. *IEEE Transaction on Smart Grid*, 2(3), 456-467.
- Departamento Nacional de Planeación. (2014). Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2014–2018. Bogotá D.C.
- Flath, C., Gottwalt, S., & Ilg, J. P. (2012). A Revenue Management Approach for Efficient Electric Vehicle Charging Coordination. 45th International Conference on System Sciences. Hawaii.
- Gharbaoui, M., Valcarenghi, L., Bruno, R., Martini, B., Conti, M., & Castoldi, P. (2012). An Advanced Smart Management System for Electric Vehicle Recharge. *IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*. Greenville, SC, USA.
- Jewell, N., Naber, J., McIntyre, M., & Turner, M. (2012). A Power Monitoring and Control System to Minimize Electricity Demand Costs Associated With Electric Vehicle Charging Stations. *IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, (págs. 1-5). Greenville, SC, USA.
- Khatod, D., Pant, V., & Sharma, J. (2006). A Novel Approach for Sensitivity Calculations in the Radial Distribution System. *IEEE transactions on Power Delivery*, 21(4), 2048-2057.
- Masoum, A., Deilami, S., Moses, P., Masoum, M., & Abu-Siada, A. (2011). Smart load management of plug-in electric vehicles in distribution and residential networks with charging stations for peak shaving and loss minimisation considering voltage regulation. *Generation, Transmission & Distribution*, 5(8), 877-888.
- Mendoza, C. C., Quintero, A. M., Santamaria, F., & Alarcon, A. (2015). Metodología para Gestionaren Tiempo Real laRecargaMasiva de Vehículos Eléctricos. *IEE Latin America Transactions*(En revisión).
- Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. (2010). Estrategia Integral para el Impulso del Vehículo Eléctrico en España. España.
- Mossberg, J., & Kuhlich, M. (2012). Adaptability and flexibility of a charging station for electric vehicles. *Schneider Electric Industries SAS*.
- Ochoa, L., & Harrison, G. (2011). Minimizing Energy Losses: Optimal Accommodation and Smart Operation of Renewable Distributed Generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(1), 198-205.
- Peng, Y., Shun, H., Zou, J., & Wang, D. (2005). Improved Method Based on Second Order Loss Sensitivity for Voltage Collapse. *International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*.

- Pieltain, L., Gómez, T., Cossent, R., Domingo, C., & Frías, P. (February de 2011). Assessment of the Impact of Plug-in Electric Vehicles on Distribution Networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(1).
- Prias Caicedo, O. (2010). Informe Final: Plan de acción al 2015 con visión al 2025 (PROURE) . Bogotá D.C.: Ministerio de Minas y Energía República de Colombia .
- Richardson, P., Flynn, D., & Keane, A. (2012). Local Versus Centralized Charging Strategies for Electric Vehicles in Low Voltage Distribution Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(2), 1020-1028.
- Sánchez-Triana, E., Ahmed, K., & Awe, Y. (2007). Prioridades ambientales para la reducción de la pobreza en Colombia. Washington D.C.: Banco Mundial, Mayol.
- Sortomme, E., Hindi, M. M., MacPherson, S. J., & Venkata, S. S. (March de 2011). Coordinated Charging of Plug-In Hybrid Electric Vehicles to Minimize Distribution System Losses. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(1).
- Tremblay, O., & Dessaint, L.-A. (2009). Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for Electric Vehicles Applications. *World Electric Vehicle Journal*, 3.
- Unidad de Planeación Minero Energética UPME. (2010). Plan de expansión de referencia Generación-Transmisión 2010-2024. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía.
- van den Bulk, J. (2009). The development of the costs and benefits of cars powered by gasoline, electricity and hydrogen in the Netherlands in the period 2008 – 2030. Netherlands : Wageningen University.
- Wen, C.-K., Chen, J.-C., Teng, J.-H., & Ting, P. (December de 2012). Decentralized Plug-in Electric Vehicle Charging Selection Algorithm in Power Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4).
- Wickert, M., Baier, A., Lichtner, P., & Prior, J. (2010). Benefit of a Simulation Model of a Decentralized Energy Management System for Electric Vehicle Charging. *Emobility–Electrical Power Train*, 1-7.
- Zhiwei, X., Zechun, H., Yonghua, S., Zhuowei, L., Kaiqiao, Z., & Junyang, W. (2012). Coordinated Charging Strategy for PEVs Charging Stations. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. San Diego, California, USA.

