

Estrategia de estimación de modelo de carga para el vehículo eléctrico

Load model estimation strategy of electric vehicle

J. Gil-Aguirre¹, J. Mora-Flórez², S. Pérez-Londoño³

¹Grupo ICE³, Programa de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Email: juanfer26@utp.edu.co

²Grupo ICE³, Programa de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Email: jjmora@utp.edu.co

³Grupo ICE³, Programa de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Email: saperez@utp.edu.co

RECIBIDO: abril 21, 2017. ACEPTADO: junio 02, 2017. VERSIÓN FINAL: noviembre 01, 2017

RESUMEN

En este artículo se analiza el ajuste de un modelo matemático de una estación de carga de vehículos eléctricos, al considerar los procesos de conexión y desconexión simultánea y/o independiente de los mismos y los períodos de carga, definidos por la tecnología empleada en la batería. La validez de la propuesta fue realizada en un ambiente de simulación donde se consideraron elementos como las baterías, el convertidor y la red. Los resultados obtenidos demuestran que las perturbaciones que se presentan en la carga considerada, pueden ser replicadas al emplear los modelos de carga del tipo exponencial, ajustados a las características del vehículo.

PALABRAS CLAVE: Estimación de parámetros, vehículo eléctrico, modelo de carga, perturbación.

ABSTRACT

This paper is oriented to analyse the model fit of a charging station of the electric vehicles, considering simultaneous and not simultaneous connection and disconnection of the vehicles and also the load periods according to the battery technology. The proposed strategy is tested in a simulation environment where elements as batteries, converters and the electric grid are considered. The obtained results demonstrate that the perturbations on the load can be also obtained or simulated, when exponential load models adjusted to the electric vehicle characteristics are used.

KEYWORDS: Parameter estimation, electric vehicle, load modelling, disturbance.

1. INTRODUCCIÓN

Las políticas e incentivos que se promueven en varios países, para disminuir el impacto medioambiental que ha causado el hombre, mediante la utilización de recursos no renovables contaminantes, está logrando cambios de paradigmas en los estilos de consumo y demanda de bienes, hasta hace algunas décadas impensables. Por ejemplo, según datos del reporte reciente de la agencia Internacional de Energía, la demanda de vehículos eléctricos por parte de China, alcanza niveles de casi el 44% de la demanda mundial, según la figura 1 [1]. Esto representa algo así como 200 millones de vehículos eléctricos de dos ruedas y más de 300.000 buses eléctricos.

Ante el panorama anterior y con la tendencia creciente de la integración de otros tipos de cargas a los sistemas de distribución actuales, tales como sistemas de almacenamiento de energía o vehículos eléctricos, es necesario determinar cuál es el posible impacto que

tendrán sobre la estabilidad de un sistema. Por tanto, la obtención de modelos ajustados a los comportamientos especiales de estos tipos de cargas, permitirá desarrollar estudios más detallados.

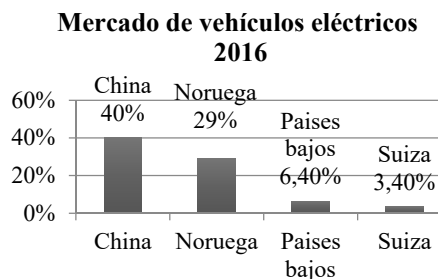


Figura 1. Mercado de vehículos según IEA Fuente. [1].

Para la obtención de los modelos de carga se recurre a dos enfoques: uno basado en componentes, en el cual a partir del conocimiento de las características

individuales de las cargas conectadas a un barraje, se aproxima un comportamiento, o el basado en mediciones, en el cual, mediante registros de tensiones y potencias obtenidos en un barraje específico, se aplican técnicas de estimación, para definir los parámetros de un modelo predefinido.

Si se consideran las características de los sistemas de medición actuales, empleados en las redes tanto de potencia como de distribución, y a los retos que supone modelar estaciones de carga de vehículos eléctricos por su comportamiento variable en cuanto a composición y cantidad de cargas conectadas en un determinado instante, diversidad en los tipos de vehículos empleados (solo de baterías o híbridos), entre otros, se presenta el enfoque basado en mediciones, como una alternativa viable para la obtención de modelos de carga. En este caso es preciso definir un modelo matemático, que pueda ajustarse a la dinámica propia de la estación de carga. En la revisión bibliográfica relacionada con el modelo del vehículo eléctrico, se encuentran algunos modelos clásicos propuestos como el ZIP [2], donde se justifica que este tipo de aproximación se puede emplear, debido a que, entre la gran variedad de métodos para recargar las baterías, los más empleados son los métodos de corriente constante y/o voltaje constante. Por otra parte, en [3] se propone un modelo de carga exponencial, que presenta una componente de potencia constante y otra que es dependiente de la tensión. Esta dependencia es de gran importancia para determinar la estabilidad en sistemas con presencia de vehículos eléctricos. Dicho modelo ha sido empleado en [4-5] para estudios sobre el impacto en las redes actuales y en [6] para determinar la mejor ubicación para una estación de carga de vehículos eléctricos, considerando márgenes de estabilidad y cargabilidad del sistema de distribución. Por esta razón y dada la aplicabilidad de dicho modelo, en este artículo se valida el modelo, específicamente para una estación de carga, donde se analiza la dinámica presentada por el cargador y la batería, ante la conexión de varios vehículos en diferentes instantes.

Este artículo tiene la siguiente estructura: En la sección 2 se presentan los elementos que constituyen una

estación de carga rápida para vehículos eléctricos, así como una descripción de la función de cada uno de ellos. Posteriormente en la sección 3, se describe la metodología empleada en la obtención de los parámetros del modelo de carga para la estación, y el modelo empleado para la estimación.

Finalmente, en las secciones 4 y 5 se presentan los resultados y las conclusiones obtenidas al ajustar el modelo de carga exponencial, al comportamiento de la estación de carga.

2. DISEÑO DE LA ESTACIÓN DE CARGA

En el diseño de una estación DC de carga para vehículos eléctricos se deben considerar diferentes aspectos técnicos, como los que se mencionan a continuación:

- Estimación de la demanda para el área en donde se va a situar la estación.
- Parámetros de la red, nivel de tensión y capacidad de potencia demandada.
- Máxima tasa de consumo de potencia para cada vehículo (niveles de carga para estaciones DC de carga rápida) [7].

La mayoría de estaciones de carga para vehículos eléctricos, consisten fundamentalmente de tres partes: un convertidor en fuente de tensión (VSC, *Voltage Source Converter*, por sus siglas en inglés), una serie de surtidores de potencia o cargadores para los vehículos eléctricos (convertidores DC/DC Boost y/o Buck) y un esquema general de control para cada uno de los convertidores [8].

La estación de carga propuesta se muestra en la figura 2 [8], en donde ésta se conecta a la red eléctrica por medio de un filtro R-L y un transformador, y sigue un esquema de control de tensión en el lado DC, el cual se encarga de acoplar la red con el sistema DC de cargadores de baterías. El control de la tensión es posible gracias al condensador de soporte que se conecta al lado DC del VSC. Dicho soporte en la tensión, permite variar las corrientes de referencia del control, según las condiciones operativas impuestas por la conexión y desconexión de los vehículos eléctricos a la estación.

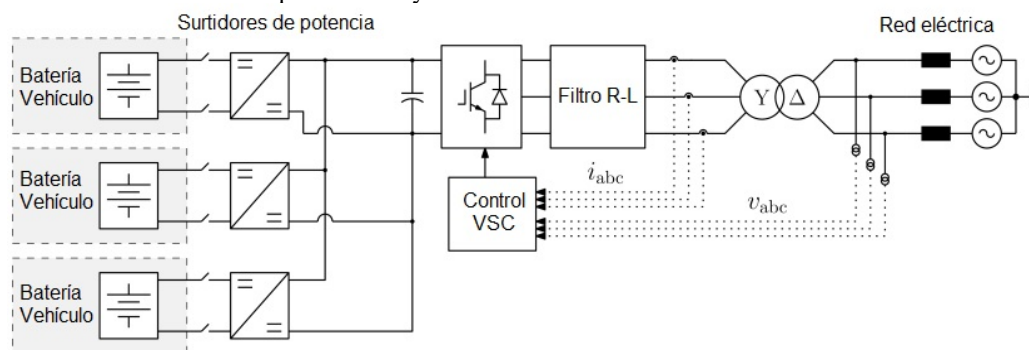


Figura 2. Estación de carga DC. Fuente. [8].

2.1. Convertidor en fuente de tensión (VSC)

En [9] y [10] se presenta una comparación de diferentes topologías para este tipo de convertidores, desde las de dos niveles hasta las multinivel. En el presente artículo, se hace uso de la topología básica de dos niveles y tres brazos; en la que se utiliza seis dispositivos de conmutación (IGBT + diodo en anti paralelo) y un condensador de soporte. Las ventajas más destacadas que ofrece esta arquitectura son su simplicidad, facilidad de control y menor volumen.

La utilidad fundamental del VSC es que la tensión continua de un lado se convierte alterna, a la frecuencia fundamental del sistema con magnitud y fase controlada. Sin embargo, lo interesante de la operación del VSC es su capacidad de generar tensiones balanceadas y controladas, sin alterar la impedancia del sistema, de manera que puede entregar o absorber potencia activa, actuando como inversor o rectificador. Por otra parte, se emplea un filtro R-L para la eliminación de los armónicos generados por el VSC. En [11] se presenta un análisis de los filtros empleados para esta tarea, con sus ventajas y desventajas.

2.2. Surtidor o cargador para vehículos eléctricos

El cargador es un convertidor DC/DC bi-direccional con dos dispositivos IGBT) que operan en estados complementarios como en la figura 3 [12]. Cuando el dispositivo de conmutación ubicado en la parte inferior esté operando, el convertidor actúe en modo Boost y por lo tanto la corriente i_{bat} , fluya a través del inductor L_{bat} hacia el condensador. Cuando el dispositivo de la parte superior está operando (modo Buck), la corriente i_{bat} , fluye desde el condensador hacia la batería.

Debido las complejas características de carga y descarga que presentan las baterías, es necesario disponer de modelos que sean precisos. Para efectos de la simulación en este artículo, se emplea la batería de ión de litio incorporada en el paquete Simulink de Matlab.

2.3. Esquemas de control

Para la operación de la estación de carga, se disponen de dos esquemas de control: el primero se encarga del intercambio energético entre el lado AC de la red y el lado DC del condensador de soporte. El segundo esquema se encarga del control individual de los vehículos eléctricos y depende del estado de carga de las baterías y de la magnitud de su corriente [8].

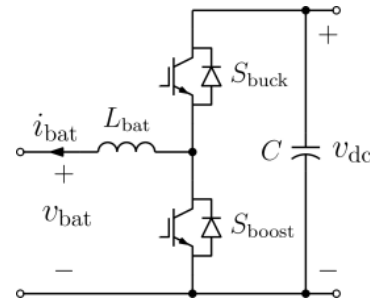


Figura 3. Configuración del cargador para vehículos eléctricos. **Fuente.** [8].

2.3.1. Control interfaz AC/DC.

Este control es un sistema en cascada, donde cada etapa recibe como entrada, la salida de la etapa previa. Las principales etapas son: el control de corrientes o control interno (*inner current loop*), el control de tensión o control externo (*outer voltage loop*) y una etapa de sincronización con las tensiones de la red, que se realiza a través de un lazo de seguimiento de fase (PLL, *Phase Locked Loop*). El esquema de control se muestra en la figura 4 [8]. Para facilidad en la implementación, se hace necesario llevar el sistema a coordenadas dq.

El control externo en su componente de eje directo d, se encarga de controlar la tensión en la barra DC del condensador de soporte, mientras que la misma componente en el control interno, ejerce control sobre la corriente activa de la red AC. La componente de eje de cuadratura q, en el control externo, regula la magnitud de la tensión AC, al ajustar la corriente reactiva, que a su vez se controla por medio de la componente de eje de cuadratura del control interno.

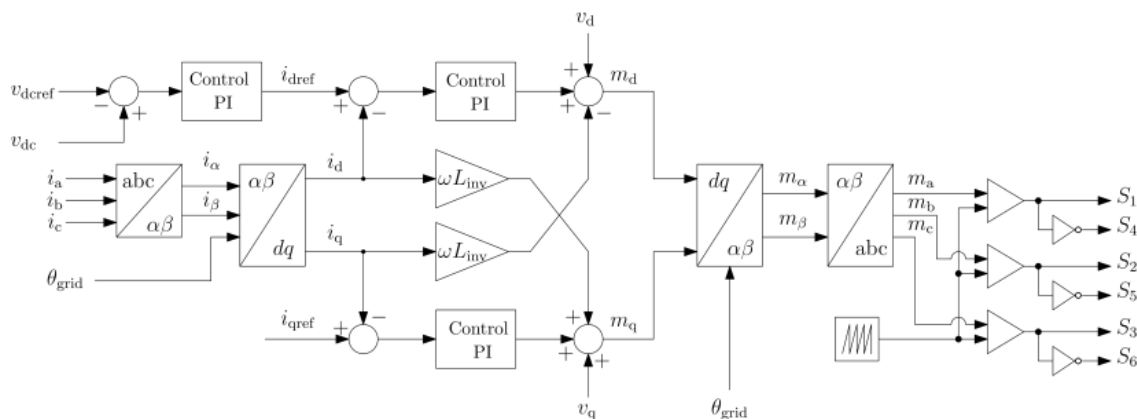


Figura 4. Esquema de control interfaz AC/DC. **Fuente.** [8]

Por su parte, el PLL toma las mediciones de las tensiones de red y entrega las tensiones, ángulos y frecuencias transformadas y en sintonía con la red, para alimentar los controles interno y externo. En [13], se presentan varias configuraciones para el uso del PLL.

El esquema del PLL se muestra en la figura 5.

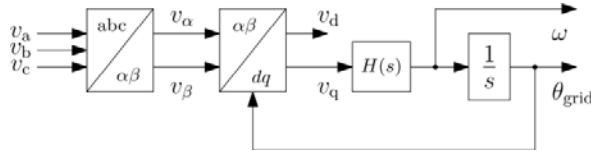


Figura 5. Esquema del PLL implementado. **Fuente.** [8].

2.3.2. Control del cargador de baterías.

Para este control se pueden emplear dos estrategias, la de carga a corriente constante o a voltaje constante. En la figura 6 se muestran ambas estrategias [8].

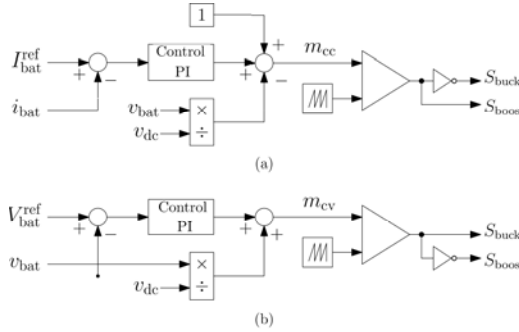


Figura 6. Control del cargado de baterías: (a) estrategia de corriente constante, (b) estrategia de voltaje constante. **Fuente.** [8].

En este estudio se implementa la estrategia de voltaje constante para el proceso de carga de las baterías.

El estándar SAE J1772 define tres niveles de carga rápida para las estaciones de carga DC, nivel 1 para 200/450 V, potencias hasta 36kW (80A), nivel 2 para 200/450 V, potencias hasta 90kW (200A) y nivel 3 para 200/600 V, potencias hasta 240kW (400A) [7]. Para este artículo, se propone un esquema de operación para la estación de carga, donde se consideran vehículos eléctricos con los tres niveles de carga mencionados anteriormente (véase sección cuatro).

3. ESTRATEGIA DE ESTIMACIÓN DEL MODELO DE LA ESTACIÓN DE CARGA

Se utiliza la estrategia de modelado de carga basado en mediciones, la cual consiste en tomar la información obtenida del monitoreo del consumo de potencia en la estación de carga, cuando cuatro vehículos arriban a recargar sus baterías, con el propósito de estimar las características del comportamiento de la misma. Esta estimación se consigue mediante dos pasos, el primero consiste en definir una estructura de un modelo, a partir del conocimiento previo aproximado que se tenga de la composición de la carga, y finalmente, mediante un

proceso de ajuste de parámetros, se determinan los que mejor se ajustan a las mediciones obtenidas [14].

En la figura 7 [14], se muestra el esquema general del proceso de obtención de un modelo de carga, a partir de las mediciones del sistema.

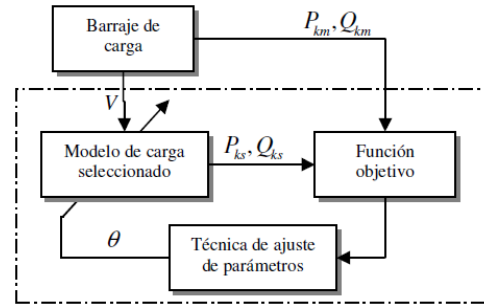


Figura 7. Esquema general del proceso de estimación. **Fuente.** [14].

En donde, V es la tensión sobre la carga, P_{km} y Q_{km} son las mediciones de potencia activa y reactiva respectivamente, P_{ks} y Q_{ks} son los valores de potencia activa y reactiva simuladas y finalmente θ es el vector de parámetros del modelo de carga estimados.

El modelo de la estación de carga que se utiliza en este estudio presenta la estructura que se muestra en la ecuación (1) y fue propuesto en [3].

$$P/P_0 = k_{cp} + k_{vd}(V/v_0)^\alpha \quad (1)$$

Donde P_0 es la potencia consumida a la tensión de referencia v_0 , k_{cp} representa la tasa de variación de la componente total de potencia P_{cp} respecto a la entrada total de potencia P a la tensión de referencia, k_{vd} representa la tasa de variación de la componente dependiente de tensión P_{vd} respecto a la entrada total de potencia P a la tensión de referencia, finalmente, α es el parámetro que determina el tipo de variación que puede presentarse entre la potencia y la tensión de los vehículos eléctricos [3].

3.1. Estimación de parámetros.

Es el proceso que consiste en determinar el conjunto de parámetros que mejor ajusta la respuesta de un modelo a un conjunto de mediciones. La estimación de parámetros se plantea como un problema de optimización, en el que se busca minimizar la diferencia entre los valores medidos desde el sistema de potencia con los valores simulados por el modelo de carga. La función objetivo a minimizar se muestra en (2).

$$\min \sum_k [(P_{km} - P_{ks}(\theta))^2 + (Q_{km} - Q_{ks}(\theta))^2]/N \quad (2)$$

Donde N es el número total de muestras y la técnica meta-heurística de búsqueda tabú es la utilizada.

3.2. Optimización por medio de la búsqueda tabú.

Búsqueda Tabú, es un algoritmo meta-heurístico basado en trayectorias, es decir que debe partir de una solución o configuración inicial que puede ser construida mediante algún procedimiento heurístico o seleccionada de forma aleatoria e iterativamente tratar de mejorarla moviéndose al vecindario de mejor calidad, esto se logra bloqueando soluciones de mala calidad durante cierto número de iteraciones (lista tabú) y en caso de atascarse en óptimos locales, puede degradar la solución actual para encontrar un nuevo vecindario de exploración [15].

El algoritmo consta de los siguientes pasos:

Inicializar: Definir el número de vecinos y el periodo de bloqueo de la lista tabú.

Paso 1: Generar un vector de configuración inicial de tantas posiciones como variables existan para iniciar el proceso iterativo (aleatorio).

Paso 2: Evaluar la función de adaptación en su configuración actual y se guarda como mejor solución.

Paso 3: Actualizar la configuración mediante el algoritmo básico de búsqueda Tabú. Esto es, generar el vecindario de la configuración actual y evaluar configuraciones vecinas que no se encuentren en lista Tabú o que de encontrarse en ésta generen una mejor solución que la configuración actual, esta última estrategia se conoce como criterio de aspiración.

Paso 4: Si se encuentra una mejor solución, se almacena como solución actual.

Paso 5: Actualizar la lista Tabú.

Paso 6: Verificar el criterio de parada. De ser satisfecho, parar. De lo contrario se vuelve al paso 3.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la estación de carga descrita, se plantea el siguiente esquema de operación: en el segundo 0, se conecta el vehículo A con nivel de carga 1. A los 2 segundos se conecta el vehículo B con un nivel de carga 2. A los 7 segundos llega el vehículo C con el mismo nivel de carga que B. Finalmente, a los 12 segundos se conecta el vehículo D con un nivel de carga 3.

Como medidas básicas se tiene la tensión DC del condensador de soporte y la tensión de alimentación en uno de los vehículos eléctricos, como se muestra en las figuras 8 y 9.

Con el esquema de operación propuesto para la estación de carga, se realiza la estimación para el modelo de carga descrito en (1), siguiendo la metodología descrita en la sección anterior.

Los resultados de la estimación se muestran en las figuras 10 a, b y c. Se evidencia que el modelo de carga, logra ajustarse para los registros correspondientes a los estados de carga 1 y 2 de la estación. Sin embargo, la estimación del modelo para el registro completo no logra reproducir satisfactoriamente el comportamiento

real de la estación de carga. Esto se puede explicar desde la formulación misma del modelo, ya que se requieren variaciones en la tensión para reproducir variaciones en la potencia, sin embargo, como se está ejerciendo control sobre la tensión de entrada del sistema, las mediciones que se emplean para la estimación del modelo, no logran percibir la totalidad de la perturbación que se presenta en el sistema, cuando se conecta un nuevo vehículo al sistema.

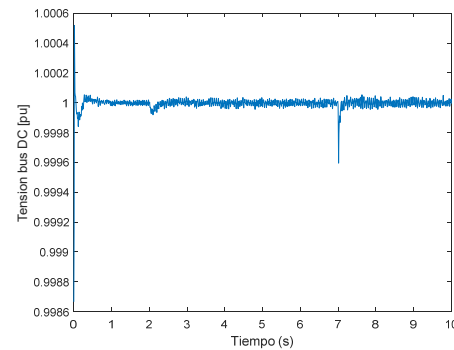


Figura 8. Tensión DC en el condensador de soporte. **Fuente.** Elaboración propia.

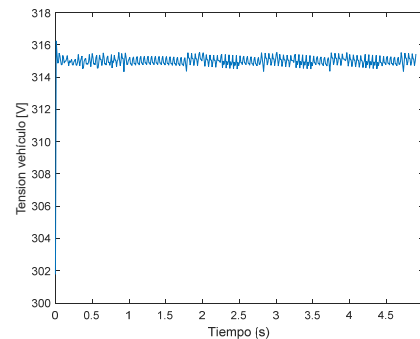


Figura 9. Tensión en vehículo con nivel de carga 1. **Fuente.** Elaboración propia.

5. CONCLUSIONES

A partir de la implementación de la metodología propuesta, se observa el comportamiento de una estación de carga para vehículos eléctricos. Se encontró que el modelo de carga empleado, solo logra ajustarse a registros de estados de carga de la estación, donde las variaciones en la tensión de entrada al modelo no son muy grandes. Por otro lado, si se quisiera un modelo que represente adecuadamente el comportamiento total de la estación, debería considerarse un modelo que esté definido en función de otra variable, que perciba de mejor manera las perturbaciones impuestas por la operación de la estación de carga de vehículos.

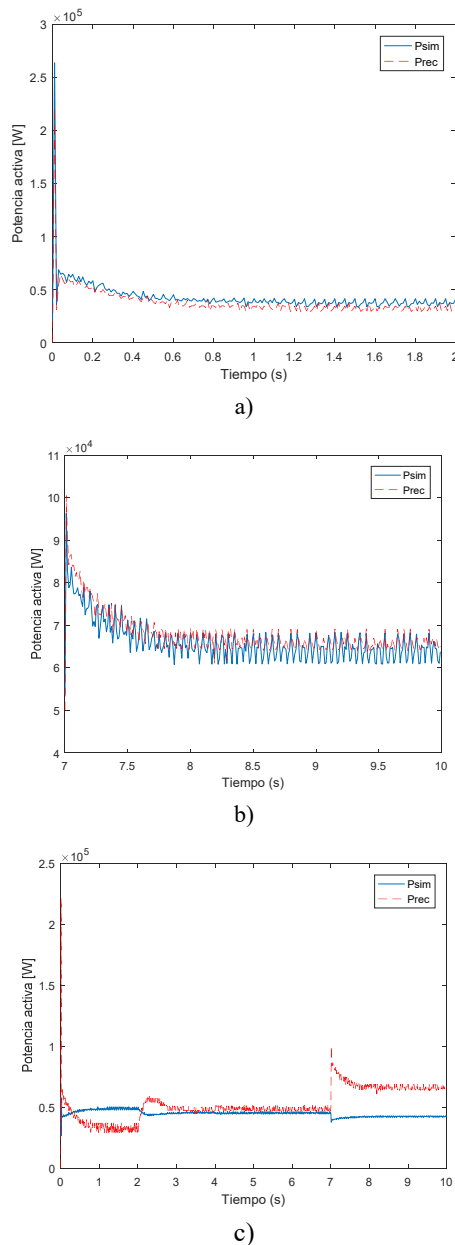


Figura 10. a) Estado de carga 1 en la estación de carga, b) Estado de carga 2 en la estación de carga, c) Estimación del registro completo. Potencia medida (Prec) y Potencia estimada con el modelo (Psim). **Fuente.** Elaboración propia.

6. REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency, Iea.org, 2017. [Online]. Available: <http://www.iaa.org>. [Accessed: 11-Jul-2017].
- [2] A. M. Haidar and K. M. Muttaqi, "Behavioral characterization of electric vehicle charging loads in a distribution power grid through modeling of battery chargers," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(1), 483-492, 2016.

- [3] C. H. Dharmakeerthi, N. Mithulananthan, and T. K. Saha, "Modeling and planning of EV fast charging station in power grid," in *Proc Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA, US, 2012.
- [4] C. H. Dharmakeerthi, C. H., Mithulananthan, and T.K. Saha, "Overview of the impacts of plug-in electric vehicles on the power grid," in *Proc of IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Asia (ISGT)*, 2011.
- [5] C. H. Dharmakeerthi, N. Mithulananthan, and T. K. Saha, "Impact of electric vehicle load on power system oscillatory stability," in *Power Engineering Conference Australasian Universities (AUPEC)*, 2013.
- [6] M. M. Rahman, S. Barua, S. T. Zohora, K. Hasan, and T. Aziz, "Voltage sensitivity based site selection for PHEV charging station in commercial distribution system," in *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, pp. 1-6, 2013.
- [7] T. O. F. Contents, "SAE J1772," in SAE, 2010.
- [8] A. Arancibia and K. Strunz, "Modeling of an electric vehicle charging station for fast DC charging," in *Proc. International Electric Vehicle Conference, IEVC*, Greenville, SC, US, 2012.
- [9] D. Krug, S. Bernet, and S. Dieckerhoff, "Comparison of state-of-the-art voltage source converter topologies for medium voltage applications," in *Proc. Industry Applications Conference*, Salt lake, UT, US, 2003.
- [10] D. Krug, M. Malinowski, and S. Bernet, "Design and comparison of medium voltage multi-level converters for industry applications," in *Proc. IEEE Ind. Appl. Conf*, Seattle, WA, US, 2004.
- [11] K. H. Ahmed, S. J. Finney, and B. W. Williams, "Passive filter design for three-phase inverter interfacing in distributed generation," in *Proc 5th International Conference-Workshop Compatibility in Power Electronics*, CPE, Gdansk, Poland, 2007.
- [12] N. Mohan, *Power electronics*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2012.
- [13] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodríguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. Vol 29, Jhon Wiley and Sons, 2010.
- [14] L. Rodríguez-García, S. Pérez-Londoño and J. Mora-Flórez, "Measurement-based exponential recovery load model: development and validation", *DYNA*, vol. 82, no. 192, pp. 131-140, 2015.
- [15] F. Glover, *Tabu search*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998.