

Research paper

Una Propuesta Metodológica para Dimensionar el Impacto de los Vehículos Eléctricos sobre la Red Eléctrica

A Methodological Proposal to Measure the Impact of Electric Vehicles on the Electric Grid

John Edward Ceballos Delgado¹, Eduardo Caicedo Bravo², Sandra Ospina Arango¹

¹Empresa de Energía del Pacífico S.A EPSA E.S.P, Yumbo Colombia.

Correo electrónico: jeceballos@epsa.com.co; sospina@epsa.com.co,

² Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Cali – Colombia.

Correo electrónico: eduardo.caicedo@correounivalle.edu.co

Recibido: 02-05-2015. Modificado: 05-10-2015. Aceptado: 03-03-2016

Abstract

Context: Based on the projected trend of electric vehicles and charging stations, it is necessary to study how is the interaction between these new elements and the electrical network. For this, a review of literature on the impact of electric vehicles on the distribution networks, with reference to countries like Spain, Chile and Co-lombia was made.

Method: Possible circuits that can be impacted by electric vehicles and the impact of different modes of transport in the electrical power quality, by simulations in MATLAB tool was determined. The information used for this research was obtained from various systems of enterprise management, the official website of the secretariats of mobility and UPME, research of domestic and foreign universities, Internet pages manufacturers of electric vehicles and charging stations, and IEEE standards, among others.

Results: A series of stages, steps, activities, outputs and responsible was obtained, associated with electric models, for determining in an orderly manner, the impact of different modes of electrical transport in both the chargeability of the distribution system, and the quality of the energy at any point in the network. Also, a use case for a city in which enough information from their electrical circuits and location of possible installation sites of charging stations be taken validated.

Conclusions: From the perspective of the application of the methodology in a use case, these results will determine how to adapt and change the infrastructure of the power grid sector companies, where there is a massive incursion of different modes of electric transportation.

Keywords: Chargeability of lines and transformers, charging stations, electric vehicles.

Acknowledgements: Empresa de Energía del Pacífico - EPSA.

Open access



© The authors; licensee: Revista INGENIERÍA. ISSN 0121-750X, E-ISSN 2344-8393. Cite this paper as: Ceballos, J. E., Caicedo, E. y Ospina, S. Una Propuesta Metodológica para Dimensionar el Impacto de los Vehículos Eléctricos sobre La Red Eléctrica. En: Ingeniería, Vol. 21, No. 2, 2016 pp. 154:175 En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2016.2.a03>

Resumen

Contexto: Partiendo de las expectativas de evolución del vehículo eléctrico y las estaciones de recarga, se hace necesario estudiar cómo será la interacción entre estos nuevos elementos y la red eléctrica. Con este propósito se realizó una revisión de literatura acerca del impacto de los vehículos eléctricos en las redes de distribución, tomando como referencia países como España, Chile y Colombia.

Método: Se establecieron los posibles circuitos susceptibles de ser impactados por los vehículos eléctricos y se determinó el impacto de los diferentes modos de transporte eléctrico en la calidad de la energía, mediante simulaciones realizadas en la herramienta MATLAB. La información que sirvió para hacer este trabajo de investigación se obtuvo de varios de los sistemas de gestión de la empresa, de las páginas oficiales de las secretarías de movilidad y de la UPME, trabajos de investigación de universidades nacionales y extranjeras, páginas de internet de fabricantes de vehículos eléctricos y de estaciones de carga y estándares de IEEE, entre otros.

Resultados: Se obtuvo una serie de etapas, pasos, actividades, salidas y responsables, asociados con modelos eléctricos, que permiten determinar de una manera ordenada el impacto de los diferentes modos de transporte eléctrico, tanto en la cargabilidad del sistema de distribución, como en la calidad de la energía en cualquier punto de la red. Asimismo, se validó un caso de uso para una ciudad en la que se tuviera información suficiente de sus circuitos eléctricos y de ubicación de posibles sitios de instalación de electrolineras.

Conclusiones: Desde la perspectiva de la aplicación de la metodología en un caso de uso, estos resultados permitirán determinar cómo debe adaptarse y cambiar la infraestructura de la red eléctrica de las empresas del sector, cuando haya una incursión masiva de los diferentes modos de transporte eléctrico.

Palabras clave: Cargabilidad de líneas y transformadores, estaciones de recarga, vehículos eléctricos.

Agradecimientos: A la Empresa de Energía del Pacífico – EPSA.

1. Introducción

En este artículo se describe una propuesta metodológica para determinar el impacto de los vehículos eléctricos en la cargabilidad y en la calidad de la energía de una red de distribución. Partiendo de las expectativas de evolución del vehículo eléctrico y las estaciones de recarga, se deduce que será necesario estudiar cómo será la interacción entre este nuevo elemento y la red eléctrica.

En primera instancia, se determina la información técnica y comercial del caso de análisis, la cual servirá de insumo para medir la cargabilidad en las líneas y en los transformadores de distribución de toda una ciudad. El análisis a este nivel macro permite determinar si bajo las condiciones de penetración de los vehículos eléctricos, capacidad de las líneas y de los transformadores de distribución, el sistema eléctrico en general está en capacidad de soportar el consumo de todos los modos de transporte eléctrico. Asimismo, permite establecer las diferentes relaciones que serán necesarias para el caso del análisis del impacto en un circuito, tal como la relación “cantidad de vehículos/transformador”.

En segunda instancia, se definen los pasos para determinar el impacto de los vehículos eléctricos en la cargabilidad de un circuito determinado, el cual es escogido partiendo de criterios donde cargarían potenciales clientes (universidades, centros comerciales, parqueaderos públicos, residencias

de estrato 4, 5 y 6) o circuitos con mayor demanda actual de energía. En este nivel es necesario detallar la cantidad, capacidad y cargabilidad actual de los transformadores de todo el circuito.

Finalmente, se determinan los pasos que permitirán conocer el impacto de los diferentes modos de transporte en la calidad de la energía eléctrica de un circuito. Para esto, primero se definen los parámetros eléctricos y sus rangos de aceptación por la norma internacional; asimismo, se establecen los modelos eléctricos de los diferentes equipos que harán parte de la simulación y por último se comparan los resultados obtenidos de los parámetros eléctricos con respecto de la norma.

El aporte fundamental de esta metodología para una empresa del sector eléctrico, se enfoca en facilitar la determinación de los circuitos que requerirán inversiones en su infraestructura de líneas, transformadores y equipos que mejoren la calidad de la energía, cuando haya una incursión masiva de V.E; de igual manera, sirve como referencia para dar a conocer las señales de ampliación de la generación de energía en el país y de la normativa que se debe elaborar para minimizar el impacto de los vehículos eléctricos en la calidad de la energía del Sistema Interconectado Nacional.

2. Proyectos desarrollados a nivel nacional e internacional sobre el impacto de los vehículos eléctricos en las redes de distribución de energía.

A continuación se describen algunos proyectos y estudios encaminados a determinar el impacto en la infraestructura y en la calidad de la energía de las redes de distribución, en países como España, Chile, Inglaterra y Colombia, aunque no consideran el desarrollo de una metodología.

Caso 1: Zona costera del Mediterráneo español [1]:

El objetivo de este caso fue cuantificar el impacto que distintas estrategias de recarga del vehículo eléctrico (cuándo y dónde se recargan) tienen en las inversiones de las redes de distribución eléctrica. Se consideraron distintos tipos de VE con sus características, como la capacidad de las baterías, el consumo medio y el recorrido diario.

Caso 2: Aplicación en la región metropolitana de Santiago de Chile [2]:

Se presentan los resultados de la investigación y análisis del estudio: Tendencias mundiales en el uso de la electricidad en el transporte (tecnologías, costos, perspectivas). Opciones para la Región Metropolitana (RM).

Caso 3: Proyecto MOVELE [3]:

Este proyecto consistió en la introducción en un plazo de dos años (2009-2010), dentro de entornos urbanos, de un mínimo de 2000 vehículos eléctricos de diversas categorías, prestaciones y tecnologías, en un colectivo amplio de empresas, instituciones y particulares, así como en la instalación de al menos 500 puntos de recarga para estos vehículos en las ciudades de Sevilla, Madrid y Barcelona en España, con el fin principal de demostrar la viabilidad técnica y energética de la movilidad eléctrica.

Caso 4: Evaluación del impacto de los vehículos eléctricos en las redes de distribución (España) [4]:

En este proyecto se estudió el impacto de los coches eléctricos en las redes eléctricas de distribución con diferentes casuísticas de comportamiento de los usuarios en la recarga de los vehículos. El modelo desarrollado permitió seleccionar varios instantes de recarga, incluso con diferentes proporciones entre ellos. También se pudieron seleccionar varios niveles de acumulación en puntos de recarga concentrada, de nuevo también con diferentes proporciones entre ellos y además respecto a la recarga distribuida.

Caso 5: Pruebas de eficiencia, desempeño y calidad de energía de cargadores AC domiciliarios de vehículos eléctricos (EVs) [5]:

El objetivo de este proyecto fue evaluar la eficiencia, desempeño y calidad de energía del sistema de recarga AC tipo I de vehículos eléctricos (EVs). En este estudio se presentaron los resultados de la simulación para los valores de V, I, THDv y THDi en el lado de baja del transformador de distribución con mayor carga asociada y bajo diferentes niveles de penetración de vehículos eléctricos.

3. Propuesta metodológica

La metodología propuesta en este artículo, la cual se muestra en la figura 1, contiene los pasos básicos para determinar el impacto de la conexión de los vehículos eléctricos en la cargabilidad y en la calidad de la energía de cualquier red de distribución de energía y está constituida por tres etapas fundamentales:

- Etapa 1. Impacto en la cargabilidad e infraestructura eléctrica de una ciudad.
- Etapa 2. Impacto en la cargabilidad e infraestructura eléctrica de un circuito.
- Etapa 3. Impacto en la calidad de energía de un circuito.

3.1. Etapa 1: Impacto en la cargabilidad e infraestructura eléctrica de una ciudad

Para determinar el impacto en una ciudad, se consideran todos los elementos que hacen parte del análisis, tales como la red de distribución base para el análisis, la caracterización del perfil de consumo de los clientes, la caracterización de los datos del vehículo eléctrico y la determinación de la carga total y cargabilidad de la red.

3.1.1. Paso 1: Información de la red de distribución

Las actividades asociadas a esta etapa son:

- Adquirir la información técnica básica y georreferenciada de circuitos, ramales, transformadores de distribución y capacidad de los conductores de media tensión. Asimismo, la ubicación de gasolineras, centros comerciales, parqueaderos públicos, universidades, controles de buses, entre otros.
- Determinar la cantidad de clientes y su potencia media contratada.

- Identificar los parámetros eléctricos de la tensión y el coeficiente de simultaneidad.

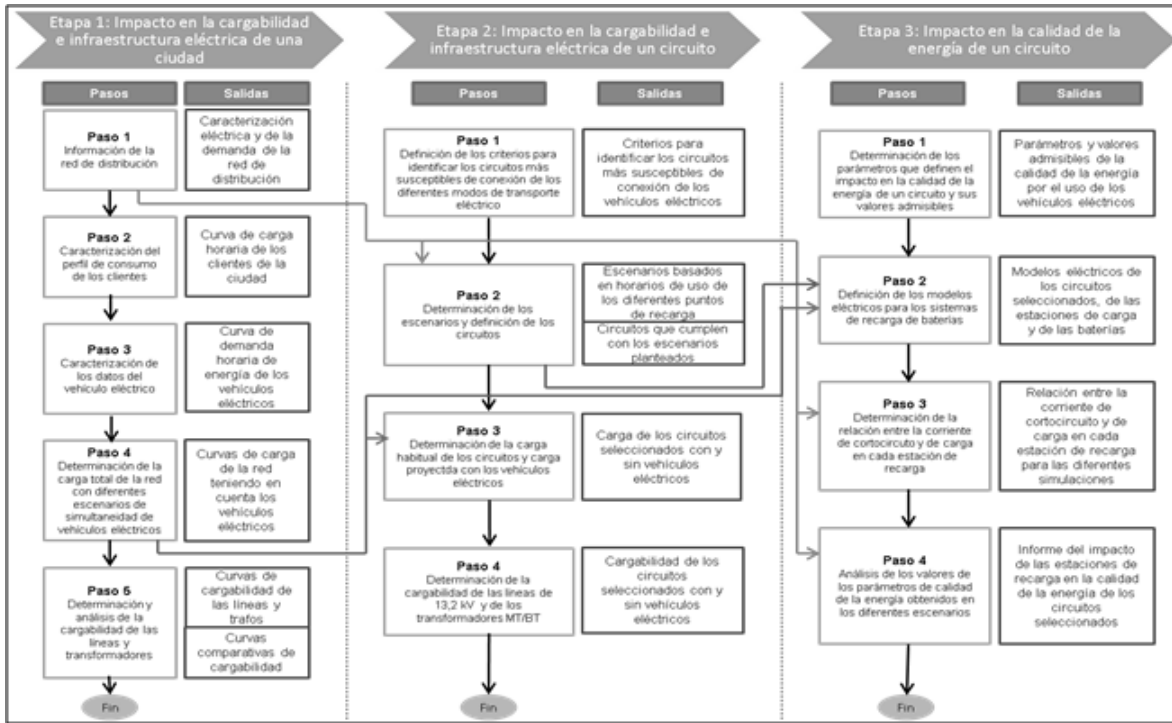


Figura 1. Diagrama de bloques de la metodología propuesta.

3.1.2. Paso 2: Caracterización del perfil de consumo de los clientes

La actividad a realizar es determinar la curva de carga representativa hora a hora, para modelar el perfil de consumo de la ciudad del caso de análisis.

3.1.3. Paso 3: Caracterización de los datos del vehículo eléctrico

Las actividades asociadas a esta etapa son:

- Determinar los hábitos de uso de los vehículos convencionales por parte de los usuarios.
- Establecer la probable curva de demanda de energía de los vehículos.
- Determinar el consumo de energía por kilómetro recorrido (kWh/km) de los vehículos eléctricos.
- Determinar la distancia promedio diaria recorrida por los vehículos eléctricos.
- Estimar la densidad de población por transformador de distribución.
- Determinar los valores de consumo energético (en kWh) medio y de alta utilización de las baterías.
- Determinar el tipo, la potencia y el tiempo de recarga de los vehículos eléctricos.
- Determinar el uso de recarga distribuida y/o concentrada.

3.1.4. Paso 4: Determinación de la carga total de la red con diferentes escenarios de simultaneidad de vehículos eléctricos

Las actividades asociadas a esta etapa son:

- Definir el intervalo temporal que abarcará el análisis.
- Determinar el grado de penetración de los vehículos eléctricos.
- Determinar el grado de desarrollo de la tecnología de las baterías.
- Identificar el caso base de evolución del sistema eléctrico sin vehículos eléctricos.
- Caracterizar las posibles ocurrencias de recarga simultánea en el Sistema.

3.1.5. Paso 5: Determinación y análisis de la cargabilidad de las líneas y transformadores.

En este paso se determina la cargabilidad de las líneas de media tensión y transformadores de distribución, antes y después del uso de los vehículos eléctricos. El grado de cargabilidad definirá las inversiones necesarias en la infraestructura eléctrica de la red de distribución para poder suministrar adecuadamente la energía a los vehículos eléctricos.

- Comparar los resultados de cargabilidad en los escenarios de igual distancia recorrida y potencia promedio.
- Analizar una situación de elevada demanda, correspondiente a un recorrido mayor.
- Comparar la cargabilidad para la recarga en punta a recorrido promedio, con el recorrido de elevada demanda.
- Analizar la cargabilidad de la red para potencias de recarga un nivel más bajo y un nivel más alto de la potencia de recarga promedio.
- Analizar la cargabilidad de la red para recargas en punta a 1 kW y 7,4 kW.
- Analizar una situación de recarga solo con electrolinerías, teniendo en cuenta el recorrido promedio diario, la potencia de recarga, el grado de penetración de los vehículos y el instante (periodos) de recarga.
- Analizar una situación de recarga en valle con varias potencias.
- Analizar una situación de recarga en punta con varias potencias, considerando las variables de control.
- Analizar una situación de recarga de motocicletas eléctricas, teniendo en cuenta el recorrido promedio diario, la potencia de recarga, el grado de penetración de los vehículos y el instante (periodos) de recarga.
- Analizar una situación de recarga de buses eléctricos, considerando las variables de control.
- Analizar la influencia de la ubicación de las electrolinerías en determinados puntos de la ciudad.

3.2. Etapa 2: Impacto en la cargabilidad e infraestructura eléctrica de un circuito

3.2.1. Paso 1: Definición de los criterios para identificar los circuitos más susceptibles de conexión de los diferentes modos de transporte eléctrico

En este paso se definen los criterios para identificar los circuitos más susceptibles de conexión de los diferentes modos de transporte eléctrico.

3.2.2. Paso 2: Determinación de los escenarios y definición de los circuitos

En este paso se determinan los escenarios propuestos para el estudio, que están basados en los posibles horarios de uso de los puntos de recarga disponibles para los diferentes tipos de vehículos. Se deben identificar los circuitos que cumplen con los escenarios para los diferentes puntos de recarga.

3.2.3. Paso 3: Determinación de la carga habitual de los circuitos y carga proyectada con los vehículos eléctricos

Las actividades asociadas a esta etapa son:

- Revisar la carga que han tenido estos circuitos, según las estadísticas de carga hora a hora.
- Identificar la cantidad de transformadores de distribución que tiene el circuito.
- Determinar la carga que tendrían los vehículos eléctricos en los posibles períodos de uso.

Del análisis que dio de todos los circuitos en la etapa 1, se conoce la relación “cantidad de vehículos eléctricos/trafo de distribución”. Este dato se puede multiplicar por el consumo de potencia de los vehículos para determinar la carga.

3.2.4. Paso 4: Determinación de la cargabilidad de las líneas de 13,2 kV y de los trafos MT/BT

En este paso se determina la cargabilidad de las líneas de distribución de 13,2 kV y de los transformadores MT/BT de dicho circuito. La forma de la gráfica de la curva de carga, dependerá del escenario que se esté analizando.

3.3. Etapa 3: Impacto en la calidad de la energía de un circuito

En esta etapa se definen las actividades que permiten determinar si las variables de voltaje, corriente, distorsión armónica de voltaje y de corriente, así como el factor de potencia, se encuentran dentro de los valores admisibles del estándar de calidad de la energía.

3.3.1. Paso 1: Determinación de los parámetros que definen el impacto en la calidad de la energía de un circuito y sus valores admisibles

Las actividades asociadas a esta etapa son:

- Definir los parámetros que determinarán el impacto en la calidad de energía de un circuito.

- Determinar el nivel admisible de armónicos de corriente y tensión, originado por la conexión de las estaciones de carga a la red eléctrica.

3.3.2. Paso 2: Definición de los modelos eléctricos para los sistemas de recarga de baterías

Para ejecutar las simulaciones de cada escenario de carga de los vehículos eléctricos en una herramienta informática, se deben definir los modelos eléctricos y electrónicos de cada uno de los componentes. Algunas de las herramientas de modelamiento son los softwares comerciales para correr flujos de carga como NEPLAN, DigSilent y Matlab. Las actividades asociadas a esta etapa son:

- Determinar el número de baterías a recargar.
- Determinar el modelo de las baterías.
- Determinar el modelo de los cargadores de baterías.
- Determinar el modelo de los componentes de la red eléctrica.

3.3.3. Paso 3: Determinación de la relación entre la corriente de cortocircuito y de carga en cada estación de recarga

En este paso se determina la relación entre la corriente de cortocircuito y de carga en cada estación de recarga, para establecer si los armónicos de corriente individuales y totales se hallan dentro de los valores admisibles por la norma. Para realizar esto, se debe sacar la relación entre la corriente de cortocircuito y la corriente de carga en el punto común de acoplamiento, es decir, en el punto de conexión de la estación de recarga.

3.3.4. Paso 4: Análisis de los valores de los parámetros de calidad de la energía obtenidos en los diferentes escenarios

Las actividades asociadas a esta etapa son:

- Correr la simulación de los probables escenarios de carga de los vehículos eléctricos en la herramienta de simulación.
- Obtener las curvas y gráficas para las tensiones y corrientes en el lado de alta y baja del transformador y determinar si los valores obtenidos de los parámetros de calidad de la energía se encuentran dentro de los rangos admisibles por la norma.

Para mayor información sobre el detalle de cada paso, así como sus relaciones con los pasos de las demás etapas, se sugiere consultar [6].

4. Resultados de la aplicación de la metodología en un caso de uso

A continuación se presentan algunos resultados de la aplicación de la metodología planteada, en donde se busca confirmar que cada una de las etapas, pasos y actividades sugeridas en forma genérica, son aplicables para determinar el impacto de los diferentes modos de transporte eléctrico,

bajo cualquier escenario de penetración, en la infraestructura eléctrica, cargabilidad y calidad de la energía en la red de distribución de una zona y circuito determinados.

El caso de uso planteado es sobre una ciudad del Valle del Cauca, la cual tiene aproximadamente 320 mil habitantes, cuenta con más de once circuitos de distribución, repartidos en varias subestaciones y contiene más de 2000 transformadores de distribución. El número de vehículos particulares, así como la cantidad de taxis, buses y motos convencionales son representativos para sacar las diferentes relaciones requeridas para el análisis.

Adicionalmente, hay diferentes espacios potenciales para instalar las estaciones de carga, tales como unidades residenciales, parqueaderos, centros comerciales y controles de buses, en donde es posible desarrollar el escenario de recarga en extremo superior, el cual considera la carga de los vehículos en la punta de la curva de la demanda, que normalmente corresponde a los periodos 19, 20 y 21 de un día de semana.

4.1. Etapa 1: Impacto en la demanda e infraestructura eléctrica de una ciudad

Para determinar el impacto en una ciudad se consideran todos los elementos que hacen parte de los análisis, tales como la información de la red de distribución, la caracterización del perfil de consumo de los clientes, la caracterización de los datos del vehículo eléctrico y la determinación de la carga total y cargabilidad de la red.

Los siguientes criterios y pasos buscan determinar la carga total de los vehículos eléctricos para los posibles escenarios de recarga simultánea en el sistema eléctrico.

Los escenarios de recarga se definen teniendo en cuenta:

- Los hábitos de uso y conducción de los vehículos convencionales. Esto determina el recorrido promedio diario (en km).
- La curva de carga diaria, en los diferentes periodos de punta, valle, horas de trabajo diurno de las personas y en horas donde las personas llegan a la casa después de su trabajo.
- El grado de penetración proyectado de los vehículos eléctricos.
- La potencia de recarga disponible actualmente para el promedio de los vehículos eléctricos existentes en el mercado. Estos son 0.5 kW, 1 kW, 3.7 kW, 7.4 kW, 50 kW y 145 kW.

Es por esto que se definen los siguientes escenarios:

- Recarga en punta. Corresponde a los periodos 19, 20 y 21.
- Recarga en valle: Corresponde a los periodos 1 al 7.
- Recarga nocturna en casa. Corresponde a los periodos 17 a 23.
- Recarga en el hogar y al llegar al trabajo. Corresponde a los periodos 7 a 12 y 17 a 23 de un día de semana promedio.

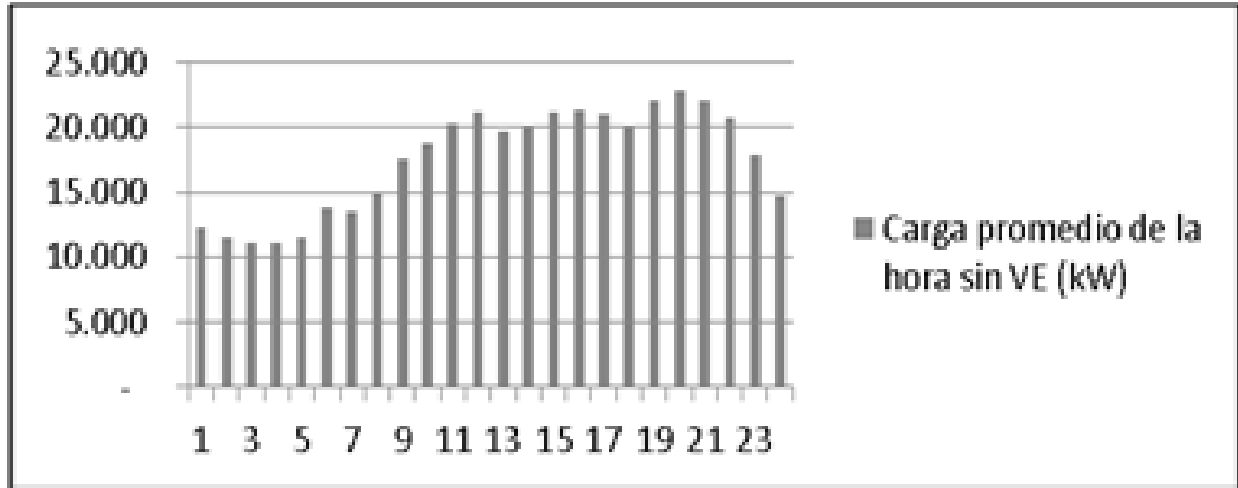


Figura 2. Curva de carga promedio de los clientes para una ciudad del Valle del Cauca.

Para modelar el perfil de consumo de la ciudad del caso de análisis, se tomó como referencia una curva de carga representativa hora a hora.

Esta gráfica proporciona en valor de potencia activa, los consumos típicos de energía para consumo residencial, industrial y comercial, como se muestra en la figura 2. Se observan los picos de consumo en los periodos 10, 11 y 12 y 19, 20 y 21.

En este apartado se comenta el escenario más importante que se va a ensayar y que servirá de referencia en el apartado de resultados. Para comprender adecuadamente cada una de las situaciones del sistema que se van a ensayar, se muestra al menos una gráfica de curva agregada de todos los consumos de los vehículos (gráfico de barras a la izquierda) y otra gráfica del incremento en la curva de carga (gráfica de curvas a la derecha) debido a los vehículos eléctricos.

Este escenario permitirá caracterizar la posible ocurrencia que puede darse en el sistema y la consecuencia respectiva. Para seleccionar este escenario se tuvieron en cuenta las curvas de carga que se esperan en la recarga de los vehículos. Además, se tuvieron en cuenta los siguientes datos:

■ **Tipo y cantidad de vehículos convencionales actuales:**

Automóviles particulares	Taxis	Buses	Motocicletas
19.000	4.000	250	11.000

■ **Variables de control:**

- Recorrido promedio diario: **35km**.
- Potencia de recarga: **3.7kW**.
- Grado de penetración de los vehículos: 20 % para automóviles particulares y 100 % para taxis.

- **Tipo y cantidad de vehículos eléctricos proyectados, dependiendo del Grado de Penetración (GDP) de cada tecnología:**

Automóviles particulares	Taxis	Microbuses /Busetas	Buses	Camiones	Motocicletas
3.800	4.000	-	-	-	-

- **Electrolineras (puntos de recarga rápida) proyectadas:**

Cantidad de electrolineras en la ciudad	Cantidad de vehículos eléctricos para recargar en una hora
32	2

- **Energía necesaria de los vehículos eléctricos para el recorrido promedio diario:**

Consumo promedio de los vehículos eléctricos (kWh/km)	Recorrido diario promedio (km)	Consumo de energía para el recorrido diario promedio (kWh)
0,2	35	7

Escenario extremo superior: Todos los vehículos recargan en punta. Esta situación permitirá delimitar para las diferentes posibilidades de recarga (concentrada y distribuida), un tope máximo de requerimientos de inversión que serán necesarios para abastecer adecuadamente al vehículo eléctrico.

Variable de control de la curva de carga:

- **Instante de recarga:** Periodos 19, 20 y 21 de un día promedio.
Para elaborar la curva de carga con la incursión de los vehículos eléctricos, se tuvieron en cuenta las variables anteriores y los siguientes parámetros:
- **Potencia de recarga de los vehículos eléctricos en una hora:**

0,5 kW	1 kW	3,7 kW	7,4 kW	50 kW	145 kW	Potencia total (kW)
-	-	28.742	-	1.600	-	30.342

- **Carga total de las líneas de 13,2 kV, teniendo en cuenta los vehículos eléctricos:**

Carga promedio de la hora en la ciudad sin tener en cuenta los V.E (kW)	Carga total de la red (kW)
22.054	52.396

Con la información anterior, la curva resultante tiene la forma de la figura 3. La forma de esta curva está determinada por la potencia de recarga seleccionada.

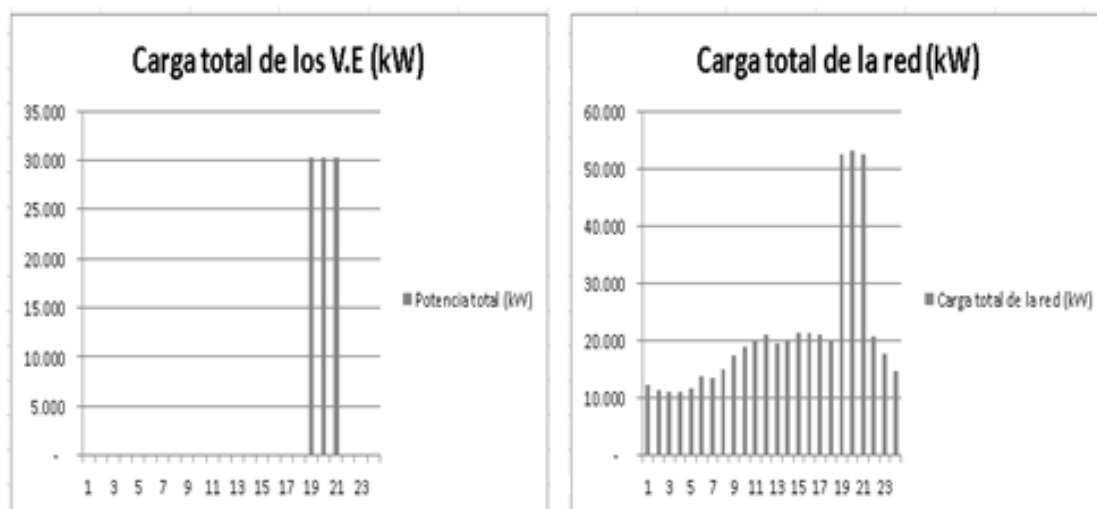


Figura 3. Carga total de los V.E y de todos los circuitos de la red para recarga en punta a 3.7 kW

4.2. Etapa 2: Impacto en la demanda e infraestructura eléctrica de un circuito

Para determinar el impacto de la incursión de los vehículos eléctricos en la demanda y en la infraestructura de un circuito, se proponen los siguientes criterios que servirán para identificar los circuitos más susceptibles de conexión de los diferentes modos de transporte eléctrico.

- Circuito(s) que alimente(n) por lo menos:
 - Universidades, centros comerciales, parqueaderos públicos y de empresas
 - Control de buses de servicio público
 - Residencias de estrato socioeconómico 4, 5 o 6 (con o sin bloques de apartamentos)
 - Gasolineras
- Circuito(s) con mayor demanda de energía.

Para definir estos criterios, primero se tuvo en cuenta los tipos de recarga posibles (1, 3.7 kW, etc.) que se pueden instalar en los puntos de recarga (residencias, centros comerciales, etc.) para las diferentes categorías de vehículos (motos, taxis, etc.). En las tablas I, II y III se muestran las matrices de relación correspondientes a cada nivel de carga (lenta, semilenta y rápida).

Tabla I. Puntos de recarga posibles de los diferentes tipos de V.E para carga lenta

Tipo de Vehículo	Puntos de recarga lenta (1-3,7 kW)						
	Estrato socioeconómico (residencial)						
	1	2	3	4	5	6	Rural
Bicicletas eléctricas				X	X	X	X
Motocicletas eléctricas				X	X	X	X
Automóviles particulares				X	X	X	X
Taxis eléctricos							
Vehículos de carga							
Buses, busetas y microbuses particulares							
Buses eléctricos de servicio público							

A continuación se definen los escenarios, que se basan en los posibles horarios de uso de los puntos de recarga disponibles para los diferentes tipos de vehículos, como se muestran en las tablas IV, V y VI.

Tabla II. Puntos de recarga posibles de los diferentes tipos de V.E para carga semilenta

Tipo de Vehículo	Puntos de recarga semilenta (7,4 kW)				
	Centros comerciales	Parqueaderos Públicos	Parqueaderos de empresas	Parqueaderos de universidades	Conjunto de apartamentos
Bicicletas eléctricas		x	x	x	x
Motocicletas eléctricas	x	x	x	x	x
Automóviles particulares	x	x	x	x	x
Taxis eléctricos					x
Vehículos de carga					
Buses, busetas y microbuses particulares					
Buses eléctricos de servicio público					

Tabla III. Puntos de recarga posibles de los diferentes tipos de vehículos eléctricos para carga rápida

Tipo de Vehículo	Puntos de recarga rápida (50 KW)						
	Gasolineras	Centros comerciales	Parqueaderos Públicos	Parqueaderos de empresas	Parqueaderos de universidades	Conjunto de apartamentos	Control de buses
Bicicletas eléctricas							
Motocicletas eléctricas							
Automóviles particulares	x	x	x	x	x	x	
Taxis eléctricos	x	x	x			x	
Vehículos de carga	x	x	x	x		x	
Buses, busetas y microbuses particulares	x			x	x	x	
Buses eléctricos de servicio público	x			x			x

Tabla IV. Escenarios para puntos de recarga lenta

Escenario por horario	Horario de carga	Puntos de recarga lenta (1-3,7 kW)						
		Estrato socioeconómico (residencial)						
		1	2	3	4	5	6	Rural
1 Recarga en la casa	6 pm a 7 am				1	1	1	
2 Recarga en horario nocturno	9 pm a 6 am				2	2	2	
3 Recarga en horario laboral	7 am a 5 pm							3
4 Recarga en la punta de la noche	7 pm a 9 pm				4	4	4	
5 Sábados	7 am a 5 pm							5
6 Domingos y festivos	7 am a 5 pm							6

Tabla V. Escenarios para puntos de recarga semilenta

Escenario por horario	Horario de carga	Puntos de recarga semilenta (7,4 kW)				
		Centros Comerciales	Parqueaderos públicos	Parqueaderos de empresas	Parqueaderos universidades	Conjuntos de apartamentos
1 Recarga en la casa	6 pm a 7 am					1
2 Recarga en horario nocturno	9 pm a 6 am					2
3 Recarga en horario laboral	7 am a 5 pm	3	3	3	3	4
4 Recarga en la punta de la noche	7 pm a 9 pm	4			4	4
5 Sábados	7 am a 5 pm	5	5		5	
6 Domingos y festivos	7 am a 5 pm	6				

Tabla VI. Escenarios para puntos de recarga rápida

Escenario por horario	Horario de carga	Puntos de recarga rápida (50 kW)						
		Gasolineras	Centros Comerciales	Parqueaderos públicos	Parqueaderos de empresas	Parqueaderos universidades	Conjuntos de apartamentos	Control de buses
1 Recarga en la casa	6 pm a 7 am						1	
2 Recarga en horario nocturno	9 pm a 6 am	2					2	2
3 Recarga en horario laboral	7 am a 5 pm	3	3	3	3	3	4	3
4 Recarga en la punta de la noche	7 pm a 9 pm	4	4			4	4	4
5 Sábados	7 am a 5 pm	5	5	5		5		5
6 Domingos y festivos	7 am a 5 pm	6	6					6

De acuerdo con esto, los circuitos que cumplen con los criterios nombrados anteriormente, son:

- Circuito 3 de la Subestación 1:

- Control de buses
- Universidad
- Gasolinera ESSO

- Circuito 5 de la Subestación 2:

- Viviendas de Estrato 5. Este es el circuito de mayor consumo de energía, representado principalmente en casas independientes y bloques de apartamentos
- Viviendas de Estrato 3

- Circuito Industrial de la Subestación 3: Contiene tres (3) centros comerciales representativos.

Para el circuito con el criterio de mayor demanda de energía, los cálculos se pueden resumir en la tabla VII.

Tabla VII. Datos básicos para calcular la cargabilidad de las líneas de 13.2 kV y de los trafos MT/BT

Cantidad de trafos de distribución del circuito	Cantidad de vehículos eléctricos/trafo de distribución	Potencia de carga de los vehículos eléctricos (según caso) (kW)	Carga máxima del circuito en el periodo sin V.E (kW)	Capacidad de la troncal del circuito (kW) (Depende del calibre del conductor)	Capacidad total de todos los trafos del circuito(kVA)	Capacidad nominal promedio de los trafos(kVA)
334	4	3,7	4627	4686	18958	50

En la tabla VIII se muestra el cálculo de la carga total de las líneas de 13.2 kV del circuito:

Tabla VIII. Cálculo de la carga total de las líneas de 13,2 kV

Cantidad de trafos de distribución del circuito	Cantidad de vehículos eléctricos/trafo de distribución	Potencia de carga de los vehículos eléctricos (según caso) (kW)	Carga de los vehículos eléctricos (kW)	Carga máxima del circuito en el periodo sin V.E (kW)	Carga total del circuito teniendo en cuenta los V.E (kW)
334	4	3,7	=334X4X3,7=	4627	=4943+4627=9570

En la tabla IX se muestra el cálculo de la carga total de los trafos MT/BT del circuito:

Tabla IX. Cálculo de la carga total de los trafos MT/BT

Cantidad de vehículos eléctricos /trafo de distribución	Potencia de carga de los vehículos eléctricos (según caso) (kW)	Carga total de los vehículos eléctricos por trafa (kW)
4	3,7	4X3,7=14,8

Para el caso de la recarga en punta, se obtiene la gráfica mostrada en la figura 4.

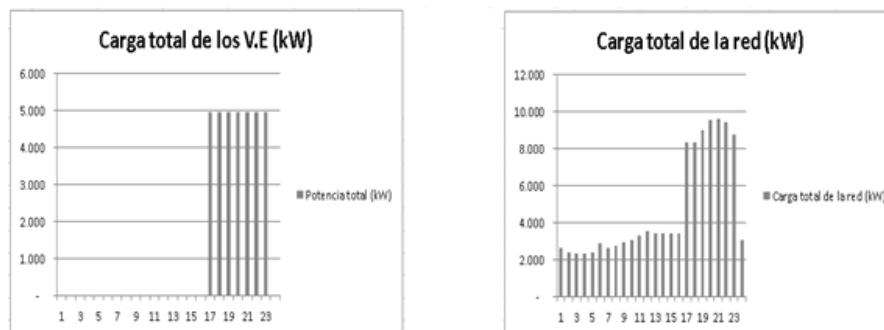


Figura 4. Recarga en punta a 3,7 kW para el circuito analizado.

4.3. Etapa 3. Impacto en la calidad de la energía de un circuito

Normalmente, los parámetros considerados para cualquier estudio de calidad de energía, se resumen:

- Distorsión armónica de tensión (THDv)
- Distorsión armónica de corriente (THDi)
- Armónicos individuales de tensión
- Armónicos individuales de corriente
- Factor de potencia (F.P)
- Tensión eficaz (VRMS)
- Corriente eficaz (IRMS)

Para determinar el nivel admisible de armónicos de corriente y tensión, originado por la conexión de estos cargadores a la red eléctrica, se toma como referencia los límites de armónicos individuales y totales de estos dos parámetros eléctricos dados por la tabla tomada de la norma IEEE 519/92 “Requerimientos y Prácticas recomendadas para Control de armónicos en sistemas de potencia”, las cuales se presentan a continuación en las tablas X y XI.

Tabla X. Límites de armónicos de corriente individuales y totales tomados de la norma IEEE 519/92

Límites de corriente armónica para cargas no-lineales en el punto de acomplamiento común con otras cargas para voltajes entre 120 a 69.000 voltios						
Máxima distorsión de corriente armónica impar en porcentaje del armónico fundamental						
ISC/IL	<11	11<17	17<23	23<35	35	TDD
<20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20<50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50<100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100<1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Tabla XI. Límites de armónicos de voltaje individuales y totales tomados de la norma IEEE 519/92

Voltaje del barraje en el punto de acomplamiento común	Distorsión individual de voltaje (%)	Distorsión total de voltaje (THD) (%)
Debajo de 69 kV	3	5
69 kV a 137,9 kV	1,5	2,5
Por encima de 138 kV	1	1,5

Los parámetros resultantes de las simulaciones se comparan con los límites mostrados en las tablas anteriores, para el lado de alta y baja tensión de los transformadores de distribución.

Para ejecutar las simulaciones de cada escenario de carga de los vehículos eléctricos en una herramienta informática, se deben definir los modelos eléctricos y electrónicos de cada uno de los componentes. Algunas de las herramientas de modelamiento son los softwares comerciales para

correr flujos de carga como NEPLAN, DigSilent y Matlab.

Para determinar la cantidad y tipo de vehículos eléctricos que se tendrán en cuenta en cada una de las simulaciones, así como la potencia de los puntos de recarga, se recurre a la información obtenida en el apartado “4.1 Etapa 1: Impacto en la demanda e infraestructura eléctrica de una ciudad”, visto anteriormente.

Adicionalmente, en el apartado “4.2 Etapa 2: Impacto en la demanda e infraestructura eléctrica de un circuito”, se definieron los criterios para llevar a cabo las simulaciones objeto de este estudio. Asimismo, se definió la manera de conocer la cantidad de vehículos eléctricos que se estarían cargando por cada trazo de distribución y la capacidad nominal promedio de los transformadores en el circuito.

Para el caso de las baterías cuyo cargador tenga una potencia igual o inferior a 7.4 kW, esta se puede simular como una resistencia y el cargador como un puente universal, tal como se muestra en la figura 5.

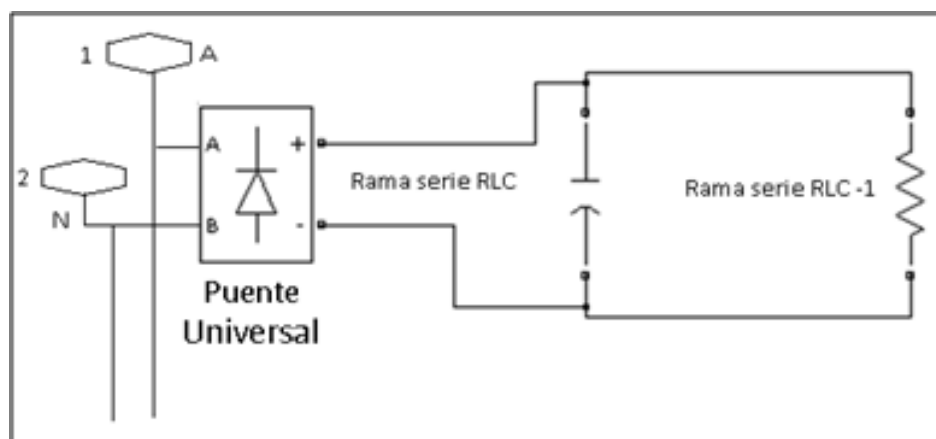


Figura 5. Modelo de un cargador de potencia inferior a 7.4 kW, conectado a una batería. Fuente: Elaboración propia en el software MatLab.

Para este modelamiento debe definirse el esquema de cada componente del circuito de distribución. Entre los más relevantes se encuentran:

- Modelo equivalente de la red en la subestación
- Modelo de la línea de media tensión
- Modelo del transformador MT/BT
- Modelo de los armónicos presentes en la línea de media tensión
- Modelo de las cargas domiciliarias
- Modelo de las cargas industriales

Por otra parte, para determinar la relación entre la corriente de cortocircuito y de carga en cada estación de recarga, para establecer si los armónicos de corriente individuales y totales están dentro

de los valores admisibles por la norma, se debe sacar la relación entre la corriente de cortocircuito y la corriente de carga en el punto común de acoplamiento, es decir, en el punto de conexión de la estación de recarga.

Con el fin de establecer dicha relación, se debe considerar la tensión nominal de la línea, la corriente de cortocircuito del barraje y el grupo de conexión del transformador. Con esta información se calculan los siguientes parámetros:

- Impedancia de la fuente
- Impedancia de la línea de 13,2 kV
- Corriente de cortocircuito en el lado de alta del transformador
- Corriente de cortocircuito en el lado de baja del transformador. Para el cálculo de la impedancia, se debe tener en cuenta que la capacidad del transformador y la tensión en el lado secundario, en **cada escenario**, pueden variar.

La parametrización de cada modelo cambia dependiendo de las condiciones planteadas en los escenarios, los cuales pueden considerar casos de recarga individual o integrada simultánea de motos, automóviles particulares, taxis y autobuses eléctricos.

En cada configuración se debe conocer y determinar:

- Tipo de barraje
- Capacidad, grupo de conexión, impedancia de cortocircuito y nivel de tensión del transformador
- Frecuencia de la red
- Cantidad y potencia de las cargas conectadas, las cuales serán los puntos de alimentación de un automóvil eléctrico
- Cargas domiciliarias en paralelo a los puntos de recarga

Las curvas y gráficas que se obtienen normalmente de las herramientas informáticas son:

- Tensión en el lado de baja del transformador
- Corriente en el lado de baja del transformador
- Tensión en el lado de alta del transformador
- Corriente en el lado de alta del transformador
- Factor de potencia del sistema
- Distorsión armónica de tensión en el lado de baja del transformador
- Distorsión armónica de tensión en el lado de alta del transformador

- Distorsión armónica de corriente en el lado de baja del transformador
- Distorsión armónica de corriente en el lado de alta del transformador

Uno de los escenarios que se pueden desarrollar es el de conexión simultánea de cargadores de baterías para todas las potencias de recarga.

Los tipos y cantidad de puntos de recarga que se asumen como ejemplo para conectar en cada transformador, son los siguientes:

- Para el transformador de 50 kVA se conectan puntos de recarga lenta de las siguientes potencias:
 - 5 puntos de 500 W (para motocicletas eléctricas)
 - 2 puntos de 1 kW (para automóviles particulares)
 - 1 punto de 3,7 kW (para taxis)
 - 1 punto de 7,4 kW (para automóviles y transporte de carga liviana)
 - Cargas domiciliarias
- Se conecta un punto de recarga rápida de 50 kW para cada transformador de 400 kVA, ubicado en los siguientes sitios:
 - Un conjunto de apartamentos
 - Una gasolinera
 - Una universidad
 - Un centro comercial
- Para el transformador de 2 MVA:
 - 2 puntos de recarga rápida de 145 kW (para buses)

El horario de recarga simultáneo sería el de la punta de la curva de demanda, dado en los periodos 19 al 21 de un día promedio.

Después de correr la simulación de este escenario en MATLAB, se obtienen curvas para las tensiones y corrientes en el lado de alta y baja de los transformadores de distribución. Algunas de ellas se presentan a continuación.

Tensión en el lado de baja de los transformadores de 400 kVA:

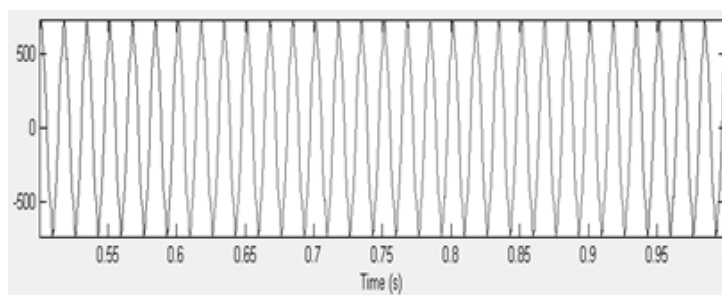


Figura 6. Tensión en el lado de baja de los transformadores de 400 kVA

En esta gráfica se puede observar una onda de tensión de magnitud 674,3 V_{peak} (476,8 V_{rms}) y frecuencia de 60 Hz. La tensión nominal se afectó levemente.

La gráfica resultante es la siguiente:

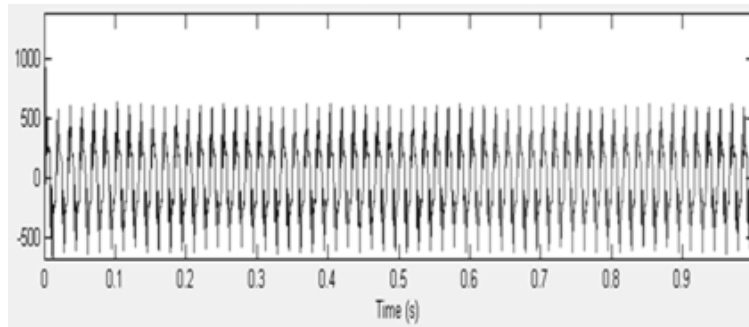


Figura 7. Corriente en el lado de baja de los transformadores de 400 kVA

En esta gráfica se puede observar una onda de corriente de magnitud 377,5 A_{peak} (266,9 A_{rms}) y frecuencia de 60 Hz.

La gráfica resultante es la mostrada en la figura 8.

Los valores obtenidos para los armónicos individuales de tensión y la distorsión armónica total (en %) se pueden observar en la tabla XII

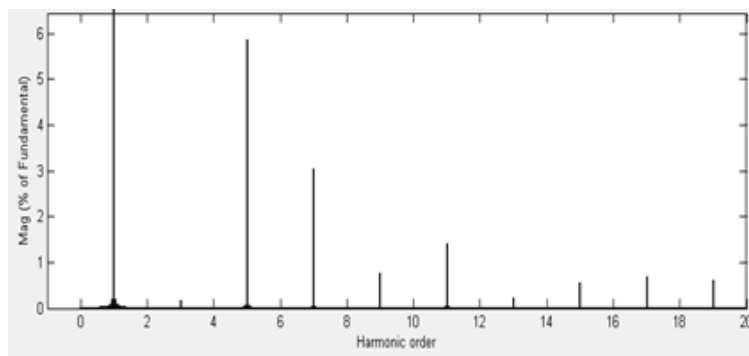


Figura 8. Distorsión armónica de tensión en el lado de baja de los transformadores de 400 kVA

La gráfica resultante es la mostrada en la figura 9:

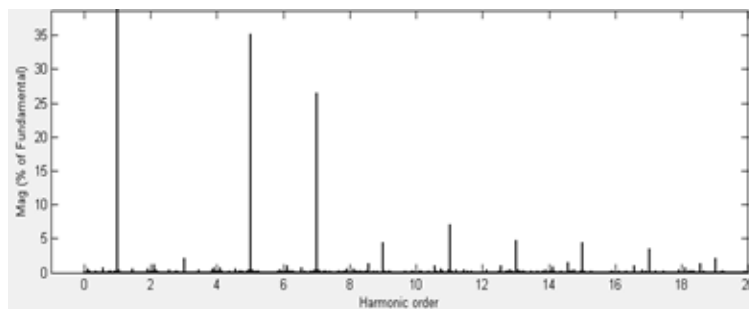


Figura 9. Distorsión armónica de corriente en el lado de baja de los transformadores de 400 kVA

Tabla XII. THDv y armónicos individuales de tensión en el lado de baja de los transformadores de 400 kVA

Fundamental	HD3	HD5	HD7	HD9	HD11	HD13	HD15	THDv
674,3 V _{peak} (100%)	0,16	5,86	3,04	0,77	1,42	0,22	0,56	7,01

Como se puede observar, la mayor componente armónica registrada es el 5° armónico.

Los valores obtenidos para los armónicos individuales de corriente y la distorsión armónica total (en %) se pueden observar en la tabla **XIII**:

Tabla XIII. THDi y armónicos individuales de corriente en el lado de baja de los transformadores de 400 kVA

Fundamental	HD3	HD5	HD7	HD9	HD11	HD13	HD15	HD17	HD19	THD _i
377,5 A _{peak} (100%)	2,11	35,18	26,52	4,37	7,14	4,7	4,39	3,50	2,15	45,76

Como se puede observar, la mayor componente armónica registrada es el 5° armónico.

Para el dato de corriente fundamental y, teniendo en cuenta el cálculo de la corriente de cortocircuito del apartado anterior, en el lado de 480 V del transformador, se tiene la ecuación **1**:

$$\frac{I_{scbaja}}{I_{Lbaja}} = \frac{10807A}{267A} = 40,5 \quad (1)$$

Con esta relación, la norma establece los siguientes valores admisibles de armónicos:

I_{SC}/I_L	HD<11	11<HD<17	17<HD<23	THD _i
20<50	7	3.5	2.5	8

5. Conclusiones

La elaboración de unas etapas, pasos y actividades, permitieron determinar en forma ordenada y sustentable una propuesta metodológica, que podría servir de referencia para identificar el impacto de los vehículos eléctricos en las redes de distribución.

Por otra parte, en cuanto avanza el tema de los vehículos eléctricos, es importante considerar paralelamente el tema de sistemas de recarga, dadas las implicaciones que tiene en la red eléctrica que soporta dicho sistema. Es por ello que cada modalidad de carga debe considerarse y estudiarse tanto económica, como tecnológicamente.

Lo anterior implica que la penetración de un elevado número de VE, correspondiente a previsiones de largo plazo, podría dar lugar a numerosos refuerzos en la red de distribución para permitir su recarga. Por lo tanto, la adopción de una estrategia de gestión temporal de la recarga podría minimizar los refuerzos necesarios.

Es por esto que las entidades de regulación y control del sistema de distribución de energía deben considerar la inclusión de estos sistemas de recarga (cargas no lineales) y sus potenciales impactos en los armónicos. Igualmente, revisar los niveles permitidos de THD de tensión y de corriente permitidos en los sistemas de recarga de EVs, que garanticen el correcto funcionamiento de las demás cargas conectadas al punto común de conexión.

Por otro lado, las recomendaciones para minimizar el impacto en la cargabilidad, están orientadas a realizar inversiones a nivel de la línea de media tensión, mas no en los transformadores de distribución, para los escenarios de recarga en punta a 35 km y 160 km.

Así como las recomendaciones para minimizar el impacto en la calidad de la energía están enfocadas a los componentes de distorsión armónica, pues la tensión y el factor de potencia, aparentemente no se ven afectados.

Teniendo en cuenta lo anterior, como posibles trabajos futuros se recomienda elaborar una herramienta de modelado para evaluar el impacto de los vehículos eléctricos en la red de distribución, así como elaborar una herramienta informática que permita conocer en tiempo real, el impacto de las estaciones de carga de vehículos eléctricos en la calidad de la energía y asimismo determinar por medio de un algoritmo, la propuesta de filtros pasivos, activos e híbridos que se podrían implementar para minimizar la magnitud de los armónicos de voltaje y corriente. Asimismo, se propone definir, diseñar e implementar una estrategia de gestión de la recarga de las baterías de los vehículos eléctricos, en los períodos del día más adecuados, con el fin de minimizar los refuerzos necesarios en las redes de distribución.

Adicionalmente, cabe mencionar que se encuentran numerosos estudios que analizan el impacto y que probablemente deben tener relación con alguna o varias de las etapas propuestas de la metodología. Entre ellos se encuentran: “The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid” [7], “Controlled electric vehicle charging for mitigating impacts on distribution assets” [8], “Impact analysis of vehicle-to-grid technology and charging strategies of electric vehicles on distribution networks A review” [9], “Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks” [10]. Estos estudios pueden servir como tema para un futuro trabajo de grado.

Referencias

- [1] P. Frías, C. Mateo y J.I. Pérez-Arriaga, “Evaluación del impacto en la integración del coche eléctrico en las redes de distribución”. LYCHNOS, volumen 6, número 1, disponible en http://www.fgcsic.es/lychnos/es_es/articulos/evaluacion_impacto_integracion_coche_electrico, 2011, octubre.
- [2] Impacto en la red eléctrica, disponible en http://web.ing.puc.cl/_power/mercados/transporteelec/pagina_web_transporte_electrico_022.htm, S.f.
- [3] F. García, F.J. Alonso y J.P. Juárez, “Impacto del vehículo eléctrico en la red de distribución”. Guía del vehículo eléctrico, capítulo 9. Fundación de la energía de la comunidad de Madrid, disponible en http://www.cleanvehicle.eu/fileadmin/downloads/Spain/Guida_%20del_%20vehiculo_%20Electrico.pdf
- [4] A. Rosso Mateo, Evaluación del impacto de los vehículos eléctricos en las redes de distribución. Madrid, 2010.
- [5] J.A Caballero P. y J.C. Chinchilla G.,”Pruebas de eficiencia, desempeño y calidad de energía de cargadores AC domiciliarios de vehículos eléctricos (EVs)”, en Conferencia del seminario de la Universidad Nacional de Colombia “Smart Grid on Electric Mobility”, Bogotá D.C., 2014.
- [6] J.E. Ceballos, “Propuesta metodológica para dimensionar el cambio en la infraestructura eléctrica de la red de distribución de EPSA ante la llegada del transporte eléctrico”, Tesis de maestría de profundización, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2015.
- [7] K Clement-Nyns, E Haesen - Power Systems, IEEE , 2010 - ieeexplore.ieee.org
- [8] V Aravinthan, W Jewell - Smart Grid, IEEE Transactions on, 2015 - ieeexplore.ieee.org
- [9] S Habib, M Kamran, U Rashid - Journal of Power Sources, 2015 – Elsevier
- [10] LP Fernandez, TGS Román, R Cossent - Power Systems, , 2011 - ieeexplore.ieee.org, disponible en https://scholar.google.com.co/scholar?cites=1951443268686077067&as_sdt=2005&scioldt=0,5&hl=es

John Edward Ceballos Delgado

Ingeniero electricista de la Universidad del Valle, Colombia. Obtuvo su título de Magíster en Ingeniería en la Universidad del Valle. Se desempeñó como Jefe de Proyectos e Innovación en la Empresa de Energía del Pacífico – EPSA, a partir del año 2010, en la cual desarrolló el proyecto del estudio de las tecnologías innovadoras asociadas a la modernización de la red de distribución. Actualmente se desempeña como Director de la Unidad de Aplicación y Ejecución de la Innovación, en la Empresa de Energía del Pacífico – EPSA, desde el año 2015.

Correo electrónico: jeceballos@epsa.com.co

Sandra Ospina Arango

Ingeniera electricista y Matemática-Física de la Universidad del Valle, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en generación de energía eléctrica en la Universidad del Valle. Se desempeñó como Gerente de Proyectos, Calidad e Innovación en la Empresa de Energía del Pacífico – EPSA, a partir del año 2009, en la cual se desarrolló el proyecto del estudio de las tecnologías innovadoras asociadas a la modernización de la red de distribución. Actualmente se desempeña como Gerente de Gestión de la Vicepresidencia de Transmisión y Distribución, en la Empresa de Energía del Pacífico – EPSA.

Correo electrónico: sospina@epsa.com.co

Eduardo Francisco Caicedo Bravo

Ingeniero electricista de la Universidad del Valle, Cali – Colombia. Obtuvo su título de Magíster en Tecnologías de la Información de la Universidad Politécnica de Madrid - España y Doctor en Informática Industrial en la misma Universidad. Actualmente se desempeña como profesor titular de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle. Es Investigador Senior Colciencias y Director del Grupo Percepción y Sistemas Inteligentes.

Correo electrónico: eduardo.caicedo@correounivalle.edu.co