



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“ESTUDIO DEL IMPACTO ELÉCTRICO EN LA RED DE MEDIA
TENSIÓN POR INGRESO DE AUTOS ELÉCTRICOS EN LA
CIUDADELA BELO HORIZONTE”

INFORME DE MATERIA INTEGRADORA

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN
POTENCIA**

RENATO JAIME LUNA AGUILAR

CHRISTIAN PAÚL SUÁREZ VARGAS

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2017

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

.....
MEngSc. Ivan Endara

PROFESOR EVALUADOR

.....
Ing. Jorge Montealegre

PROFESOR EVALUADOR

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

.....
Christian Suárez

.....
Renato Luna

RESUMEN

El presente trabajo consiste en el análisis del impacto y factibilidad para la inclusión de los vehículos eléctricos en una red de distribución considerando el tipo de recarga básica. La zona elegida para este estudio es la ciudadela Belo Horizonte en la ciudad de Guayaquil, se asume que el número de vehículos eléctricos que se toman en cuenta para el análisis es igual a los de combustión interna que poseen en la actualidad los habitantes de la ciudadela, de manera que exista una alta incidencia de esta nueva tecnología.

Los autos cuentan con una serie de componentes electrónicos para que puedan ser conectados a la red y ser recargados, mismos que generan efectos adversos en la red pudiendo ocasionar daños o disminuciones de la vida útil de los conductores y transformadores presentes; además de las consideraciones de cargabilidad de estos elementos, ya que la demanda eléctrica sufre un aumento por la presencia de los vehículos.

Mediante herramientas como Matlab Simulink se obtuvo la característica armónica de la carga de los vehículos y del comportamiento de la batería, para luego simular el comportamiento de la red en CYMDIST junto con las cargas de los domicilios, y así llevar la red a un posible escenario crítico en el que se va a analizar su desempeño. Los horarios de carga de los vehículos se determinaron en base a encuestas realizadas a los residentes.

Finalmente se analizan 3 propuestas de solución tomando en cuenta aspectos como la efectividad para la mitigación de las afectaciones que se generan por un alto nivel del tercer armónico debido a la conexión de los vehículos eléctricos, resultando finalmente la que mejores resultados técnicos presenta.

ÍNDICE GENERAL

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN	ii
DECLARACIÓN EXPRESA	iii
RESUMEN	iv
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN A LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS.....	1
1.1 Funcionamiento de los vehículos eléctricos	1
1.2 Componentes del vehículo eléctrico.....	2
1.2.1 Batería	3
1.2.2 Tipos de conectores [4]	4
1.2.3 Tipos de carga [4].....	5
1.2.5 Inversores	6
1.2.6 Motor eléctrico	6
1.3 Sistemas de redes de distribución.....	7
1.3.1 Cargabilidad de los alimentadores primarios	7
1.4 Armónicos en la red eléctrica generados por vehículos eléctricos	7
1.4.1 Soluciones ante la presencia de armónicos	8
1.5 Objetivos	9
1.5.1 Objetivo general.....	9
1.5.2 Objetivos específicos	9
1.6 Justificación	9
1.7 Alcance.....	10
CAPÍTULO 2.....	11
2. Implementación de las simulaciones	11
2.1 Simulación de la batería del vehículo eléctrico.....	11
2.1.1 Modelo del paquete de baterías NISSAN LEAF	12
2.1.2 Simulación del bloque convertidor tipo puente y 'Buck-Boost'	13
2.2 Descripción del sistema.....	14

2.2.1	Número de viviendas por transformador.....	15
2.2.2	Número de vehículos que se conectarán a la red.....	15
2.2.3	Curvas de carga	20
2.3	Simulación de la red en CYMDIST.....	25
CAPITULO 3.....		28
3.	Análisis de resultados.....	28
3.1	Paquete de baterías (Battery Pack)	28
3.2	Resultados de la simulación del bloque de convertidores y su aportación de armónicos en la red	29
3.3	Especificaciones y características tomadas de la red	34
3.4	Simulación de la red actual en CYMDIST	34
3.5	Simulación de la red incorporando los autos eléctricos.....	36
3.6	Análisis de propuestas	40
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		46
BIBLIOGRAFÍA.....		48
ANEXOS.....		49

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN A LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS.

El hombre ha centrado su existencia en el uso de combustibles fósiles como medio principal para la movilización en vehículos con motores de combustión interna. Sin embargo, la eficiencia energética de estos motores de combustión interna es muy baja, ya que se aprovecha cerca del 20% de la energía obtenida del combustible, además de las altas emisiones de dióxido de carbono (CO₂) lo que produce el deterioro atmosférico y un impacto ambiental elevado. [1]

Como consecuencia de esto, la industria automotriz ha realizado investigaciones de mejoras en los automóviles convencionales surgiendo así la idea de los vehículos híbridos y eléctricos.

Gracias a los vehículos eléctricos existirá una mejora en diferentes aspectos económicos, energéticos y ambientales. Sin embargo, existen diversos inconvenientes con respecto a su implementación ya que requieren de baterías para su funcionamiento que lleva a un limitado uso y recorrido con cada carga de la batería, debido a que la media de duración hasta su descarga es de unos 300Km de recorrido. Dado que toma 8 horas aproximadamente en cargarla completamente con un cargador convencional, esto representa un problema para muchos clientes.

Debido a esta problemática, se ha necesitado construir electrolineras en diferentes puntos de las ciudades donde existan grandes demandas de vehículos eléctricos.

Como resultado ha surgido la necesidad de realizar diversos estudios para poder incorporar los vehículos en domicilios, ya que estos requieren de energía para recargarse en un tiempo determinado lo cual podría provocar inestabilidad y saturación en las redes eléctricas de distribución a nivel de baja y media tensión.

1.1 Funcionamiento de los vehículos eléctricos.

El vehículo eléctrico está compuesto por una serie de elementos y sistemas de control, los cuales nos ayudan a un manejo y uso eficiente del mismo. Gracias a su configuración, el vehículo eléctrico aprovecha entre un 60-85% de la energía

eléctrica proporcionada por la batería para el funcionamiento del motor; a diferencia de los vehículos convencionales de combustión interna que solo aprovechan entre 15-20% de la energía eléctrica proporcionada por el combustible fósil. [2]

El vehículo eléctrico necesita recargarse con frecuencia; esto se realiza por medio de un tomacorriente y el tiempo de carga varía dependiendo del nivel de voltaje y corriente proporcionados por la red eléctrica de distribución al domicilio.

Los vehículos eléctricos cuentan también con un motor eléctrico acoplado al eje de las ruedas para darle movimiento y aprovechar la energía cinética en las ruedas que las convierte en energía eléctrica para recargar "en parte" a la batería. Hay que considerar que los vehículos eléctricos con un solo motor a pesar de que es muy potente presentan algunas pérdidas de eficiencia a través de transmisión, en cambio, los vehículos con motores independientes en cada rueda evitan dichas pérdidas, por lo que son más apropiados para pequeños vehículos que no requieren grandes potencias.

1.2 Componentes del vehículo eléctrico.

A continuación, se presentará una breve descripción de los diferentes componentes que conforman a un vehículo eléctrico en la Figura 1.1.

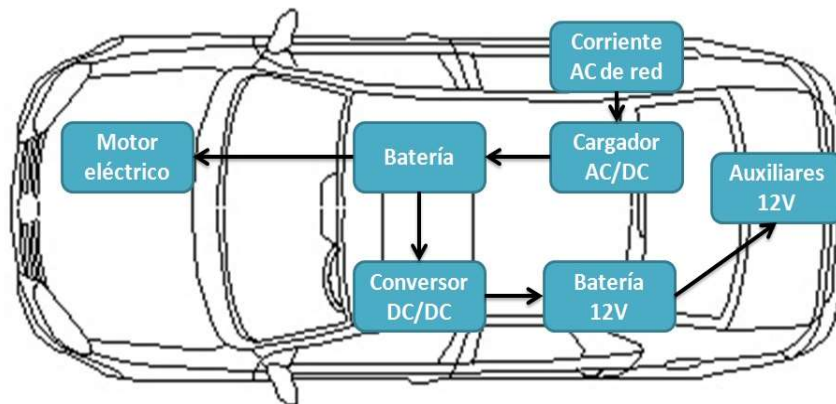


Figura 1.1: Componentes de un auto eléctrico.

1.2.1 Batería.

Las baterías son acumuladores de energía eléctrica obtenida desde el cargador en forma de corriente continua que permiten el funcionamiento del vehículo eléctrico. Existen diferentes tipos de baterías según su configuración y el material del cual están hechas. [3]

Por medio de una simulación en MATLAB Simulink, se emulará el comportamiento de la batería en sus procesos de carga y descarga para poder comprender de mejor manera su funcionamiento y lo que implicará en cuanto a la demanda energética de la red.

Entre los tipos de baterías para su posible aplicación en los vehículos eléctricos tenemos:

- **Plomo-ácido.**

Este tipo de baterías son usadas en los vehículos eléctricos como batería de arranque o tracción que son diseñadas para suministrar una intensidad de corriente grande en un tiempo muy corto. Son económicas en lo que a desempeño se trata y son capaces de entregar niveles de tensión de 6V, 12V, entre otros y almacenar 25Wh por kilogramo de peso.

- **Ion litio.**

Este tipo de batería es comúnmente utilizada en dispositivos electrónicos. En comparación con la ya nombrada, tiene una elevada capacidad de energía y resistencia a descargas. Esta batería puede almacenar 150Wh de electricidad por kilogramo de peso.

Son muy convenientes en cuanto a movilidad ya que se las puede recargar en cualquier momento sin necesidad de completar un ciclo de carga y descarga por lo que se convierten en las baterías perfectas para los vehículos eléctricos.

1.2.2 Tipos de conectores.

Actualmente en el mercado se encuentran disponibles 3 tipos de conectores:

- **Conector tipo 1 o Yazaki (SAEJ1772).**

Es un estándar norteamericano para carga de vehículos eléctricos en corriente alterna monofásica.

Este cargador posee: fase, neutro, tierra y dos bornes complementarios para detección de proximidad y de control.

Nivel 1: Hasta 16A, para recarga lenta.

Nivel 2: Hasta 80A, para recarga semi-rápida.

- **Conector tipo 2 o Mennekes (VDE-AR-E 2623-2-2).**

Este conector de origen alemán trifásico de tipo industrial tiene capacidad para cargar en corriente alterna, tanto monofásica como trifásica.

Posee 7 bornes: las 3 fases, neutro, tierra y 2 para comunicaciones.

Nivel monofásico: Hasta 16A (3,7KW), para recarga lenta.

Nivel trifásico: Hasta 64A (22KW) para recarga rápida.

- **Conector tipo 3 o Scame (EV plug-in Alliance).**

Tiene 5 o 7 bornes, ya sea para corriente monofásica o trifásica, tierra y comunicación con la red. Su nivel admite hasta 32A para recarga semi-rápida.

1.2.3 Tipos de carga.

Entre los diferentes tipos de baterías tenemos:

- **Recarga súper lenta (10 a 12 horas).**

En esta forma de recarga se tiene un máximo de 10A ya que no se dispone de una base con protección ni de una instalación eléctrica adecuada, toma en cargar entre 10 a 12 horas completamente un vehículo (22 a 24KWh).

- **Recarga convencional (6 a 8 horas).**

Este tipo de recarga aplica niveles de potencia bajos lo cual implican una recarga lenta con una duración de unas 8 horas aproximadamente. Esto es óptimo para recargar el vehículo durante la noche en un domicilio, ya que la demanda energética en horas de la noche es menor que durante el día.

La recarga convencional utiliza el mismo nivel de voltaje y corriente que una vivienda (16 A y 220 V). Esto quiere decir que la potencia eléctrica que entrega un punto es de 3.6 KW.

- **Recarga semi-rápida o quick-charge (4 horas).**

Este tipo de recarga aplica niveles de potencia medios que implican una recarga con una duración de unas 4 horas aproximadamente, esto al igual que la recarga convencional es óptima para cargar el vehículo durante la noche en un domicilio ya que emplea 32 A y 220 V, dando como resultado una potencia entregada desde un punto de 7.2KW.

- **Recarga rápida o fast-charge (30 minutos).**

La recarga rápida entrega energía en corriente continua, obteniendo una potencia de salida de aproximadamente 50KW que permite alcanzar un nivel de carga del 80% a 90% de la batería en 30 minutos. Esto da al cliente una sensación de semejanza con el vehículo de combustión interna sin embargo, las exigencias a nivel eléctrico son mucho mayores que la recarga convencional. Esto se compara a la

potencia que requiere un edificio de 15 viviendas. De este modo, este tipo de recarga puede implicar una readecuación de la red eléctrica de distribución existente.

- **Recarga ultra-rápida (5 a 10 min).**

Es un tipo de recarga que apenas se usa debido a la gran cantidad de potencia (80KW) y temperatura que es aplicada a la batería en tan poco tiempo, lo que deteriora gravemente la vida útil de las baterías.

Este tipo de recarga es utilizada en vehículos eléctricos con acumuladores de tipo supercondensador como, por ejemplo, los autobuses eléctricos.

1.2.4 Convertidor.

El conversor transforma el voltaje de entrada de corriente continua elevada que aporta la batería principal a bajo voltaje de corriente continua. Este tipo de voltaje es el que alimenta las baterías auxiliares de 12V, encargadas de alimentar los componentes auxiliares eléctricos del vehículo.

1.2.5 Inversores.

Los inversores u onduladores son los encargados de transformar la corriente continua que cede la batería principal en corriente alterna. De esa manera se puede alimentar el motor en corriente alterna del coche eléctrico. Esto es necesario ya que la mayoría de baterías, como las de los vehículos eléctricos (EV) o de un molino eólico, producen corriente continua mientras que la mayoría de los aparatos eléctricos funcionan con corriente alterna. Los inversores convierten la corriente alterna que cede la red a continua para cargar la batería principal.

1.2.6 Motor eléctrico.

El motor de un coche eléctrico puede ser un motor de corriente alterna o de corriente continua. La diferencia principal entre estos dos tipos es la forma de alimentación. El motor de corriente continua se alimenta

directamente desde la batería principal y el motor de corriente alterna se alimenta a través de la energía que emite la batería previamente convertida en corriente alterna a través del inversor.

1.3 Sistemas de redes de distribución.

El sistema eléctrico de una empresa generalmente se encuentra dividido en tres secciones: generación, transmisión y distribución.

Los sistemas de distribución que es el área de interés de este trabajo de investigación se divide en tres componentes: [5]

- Subestaciones de distribución.
- Distribución primaria.
- Distribución secundaria.

1.3.1 Cargabilidad de los alimentadores primarios.

La carga de un alimentador se encuentra definida como aquella que puede transportar durante la demanda máxima. Existe ciertos factores que afectan el diseño por carga del alimentador: [5]

- La naturaleza de la carga del alimentador.
- La tasa de crecimiento de la carga en el alimentador.
- La densidad de la carga al alimentador.
- La capacidad de reserva para condiciones de emergencia.
- Los requerimientos de continuidad del servicio.
- La calidad del servicio.
- La confiabilidad del servicio.
- El nivel de voltaje del alimentador primario.
- Ubicación y capacidad de la subestación de distribución.
- Costo de la construcción.

1.4 Armónicos en la red eléctrica generados por vehículos eléctricos.

Los armónicos son ondas cuyas frecuencias son múltiplos enteros de una onda periódica sinusoidal llamada frecuencia fundamental, los cuales provocan problemas en la red tales como sobrecarga de transformadores e inestabilidad

de tensión en áreas residenciales distorsionando considerablemente la forma de onda sinodal de la corriente alterna (AC). [6]

La introducción de armónicos en la red es generada por diferentes componentes no lineales en este caso, los convertidores o cargadores del paquete de baterías que son alimentados a través de la red eléctrica de distribución pública o domiciliaria.

Hoy en día los cargadores de vehículos eléctricos se basan en rectificadores modulados en anchura de pulsos (rectificadores PWM) o también conocido como rectificador “buck-boost”. En un circuito electrónico de este tipo, los transitorios de potencia son conmutados en una frecuencia mucho más elevada que la frecuencia de la red eléctrica, lo cual permite una corrección del factor de potencia. [6]

1.4.1 Soluciones ante la presencia de armónicos.

De existir inconvenientes en la red por presencia de armónicos, es decir, una distorsión considerable en las ondas de corriente y voltaje del sistema, se deben considerar soluciones que permitan disminuir los efectos adversos que se generan a partir de la presencia de ondas no deseadas en los conductores, que se traduce en un problema de costos para la empresa distribuidora del servicio eléctrico. [6]

El objetivo es reducir la Tasa de Distorsión Armónica (THD) y con ello todos los inconvenientes relacionados con estos, un caso ideal sería contar con alimentadores separados para brindar servicio a la red con equipos generadores de armónicos y la otra parte con componentes lineales, pero eso en la práctica no es viable, especialmente en nuestro estudio en el que los armónicos provienen de las cargas residenciales producto de la entrada de los vehículos eléctricos.

El uso de filtros activos en la red permite la generación de una corriente de igual magnitud y frecuencia armónica opuesta para que se anulen entre sí representando una solución factible para analizar en este estudio. Esta alternativa presenta varios tipos de soluciones, ya que depende de

la ubicación de los filtros en la red como también de su capacidad e inclusive el valor económico.

1.5 Objetivos.

1.5.1 Objetivo general.

- Analizar las afectaciones en la red de distribución de media tensión de la ciudadela Belo Horizonte debido a la incorporación de vehículos eléctricos en la misma.

1.5.2 Objetivos específicos.

- Analizar el comportamiento de la red de distribución una vez ingresados los vehículos eléctricos usando simulaciones.
- Analizar los diferentes perfiles de carga resultantes de la conexión de los vehículos eléctricos en la red.
- Considerar el incremento de la demanda y con ella la posibilidad de una ampliación de la red.
- Proponer diferentes soluciones a los problemas provocados en el sistema por la incorporación de los vehículos eléctricos.

1.6 Justificación.

Debido a la creciente demanda de automóviles y los alarmantes niveles de contaminación que se presentan a nivel mundial, la propuesta de los autos eléctricos posee cada vez mayor acogida tanto a nivel mundial como en Ecuador, como demuestran los recientes planes del cambio de la matriz energética. Por esta razón, ciudades importantes como Guayaquil requieren ser analizadas para verificar si sus redes eléctricas son aptas para poder brindar el servicio a todos los usuarios de esta nueva modalidad de transporte.

Como consecuencia, se necesita un análisis del impacto eléctrico en las redes de Guayaquil, principalmente en una red de distribución como la de Belo Horizonte que cuenta con el potencial para la adquisición y uso de los vehículos eléctricos (EV) que ingresarán al mercado ecuatoriano en un futuro.

1.7 Alcance.

Este proyecto está dirigido al análisis del impacto que representa el ingreso del vehículo eléctrico a una alimentadora de una red de distribución determinando si se requieren cambios en la topología de la red actual, se estima el cambio en la demanda debido a la carga domiciliaria del vehículo y los perfiles de carga que se esperarían en un futuro.

Esto se analizará por medio de una simulación del modelo matemático tanto del cargador como de la batería del vehículo en la plataforma MATLAB Simulink.

Mientras que se usará el programa CYMDIST para analizar en un día de la semana el comportamiento de la red de distribución y su respectiva comparación de resultados antes y después del ingreso de los vehículos eléctricos. El ingreso del auto será representado por la conexión de las baterías en la red en conjunto con los convertidores y su característica de distorsión armónica según sea el comportamiento del usuario y los tiempos de carga habituales.

CAPÍTULO 2

2. IMPLEMENTACIÓN DE LAS SIMULACIONES.

A continuación se detallan los diferentes tipos de simulaciones que se plantean y las herramientas digitales usadas para cada una:

2.1 Simulación de la batería del vehículo eléctrico.

La batería de un auto eléctrico, o paquete de baterías, es un conjunto de módulos, que a su vez son un conjunto de celdas, las mismas que se disponen para obtener los valores de corriente y voltaje necesarios para el funcionamiento del vehículo.

Se toma en cuenta el diseño de la batería del Nissan “LEAF” que cuenta con las siguientes características como se muestra en la Tabla 1: [7]

Celda	Estructura	Laminada
	Capacidad	33 Ah
	Cátodo	LMO
	Ánodo	Grafito
Módulo	Número de celdas	4
	Conexión de celdas	2 paralela -2 serie
	Número de módulos	48
Paquete	Energía total	24 KWh
	Potencia máxima	> 90 KW
	Razón: Potencia/Energía	≈ 4

Tabla 1: Características y configuración del paquete de baterías del Nissan ‘LEAF’.

Se empleará el modelo de celda de baterías para autos eléctricos incluido en las librerías de SIMSCAPE de MATLAB en el cual se colocarán los valores particulares de estas baterías que se presentó en la conferencia Electric Vehicle Conference de la IEEE en el año 2012. Las celdas serán conectadas de manera que cumplan con los parámetros de configuración del paquete de baterías del Nissan LEAF, para así llegar a manejar los 360 V y 66 Ah necesarios para su operación.

La simulación presenta los procesos de carga y descarga del vehículo por medio de gráficas, en las que observamos el comportamiento de voltaje y corriente generados por el paquete de baterías en el tiempo.

Para el proceso de carga y el impacto en forma de armónicos que se ven reflejados en la red se utiliza un convertidor AC/DC tipo puente en serie con un convertidor tipo 'Buck Boost'. Estos elementos son necesarios para poder conectar el auto a una red de distribución.

La capacidad de carga analizada en nuestro estudio asciende a 1.2 KW, lo que representa el proceso de carga lenta para los autos eléctricos actuales (se realiza con el cargador básico que viene incluido con el auto).

2.1.1 Modelo del paquete de baterías NISSAN LEAF.

Con los bloques de 'Pack de baterías de Ion-Litio' de Matlab Simulink se configuró la conexión de cada módulo, para esto se consideró que cada bloque representa dos celdas en serie, para luego ser conectados en paralelo como se muestra en la Figura 2.1:

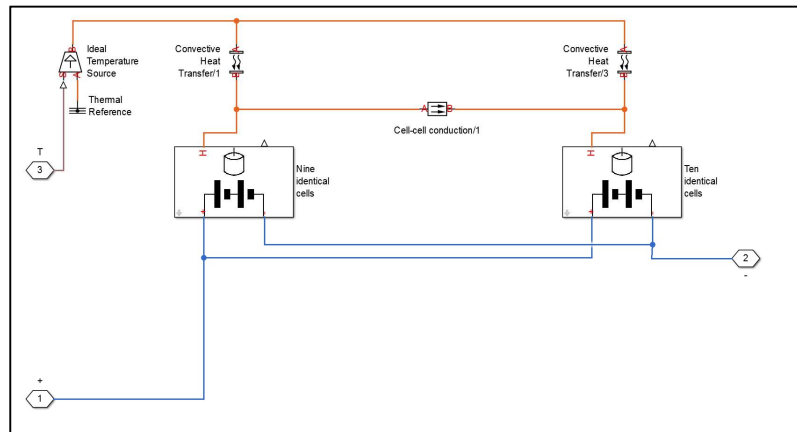


Figura 2.1: Conexión de un módulo del pack de baterías en Matlab Simulink.

A partir del diagrama de bloques resultante como se muestra en la Figura 2.1, obtenemos un módulo, el auto que se va a analizar posee 48 módulos, por lo que para llevarlo a la simulación es necesario reproducir los mismos y conectarlos entre sí, considerando las restricciones para la transferencia de las señales de bloque a bloque.

En la Figura 2.2 se muestra el diagrama completo del paquete de baterías:

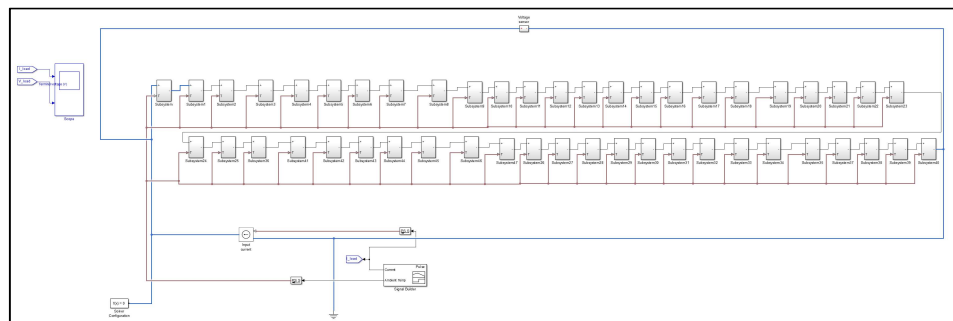


Figura 2.2: Diagrama de bloques del paquete de baterías del Nissan 'LEAF'.

2.1.2 Simulación del bloque convertidor tipo puente y 'Buck-Boost'.

Esta simulación se realizó para la obtención de los porcentajes de distorsión debido a los armónicos que se inyectan a la red dada la

presencia de elementos no lineales en los cargadores y baterías de los vehículos eléctricos.

El modelo utilizado para poder obtener los armónicos que genera un vehículo eléctrico en la red es el que se muestra en la Figura 2.3.

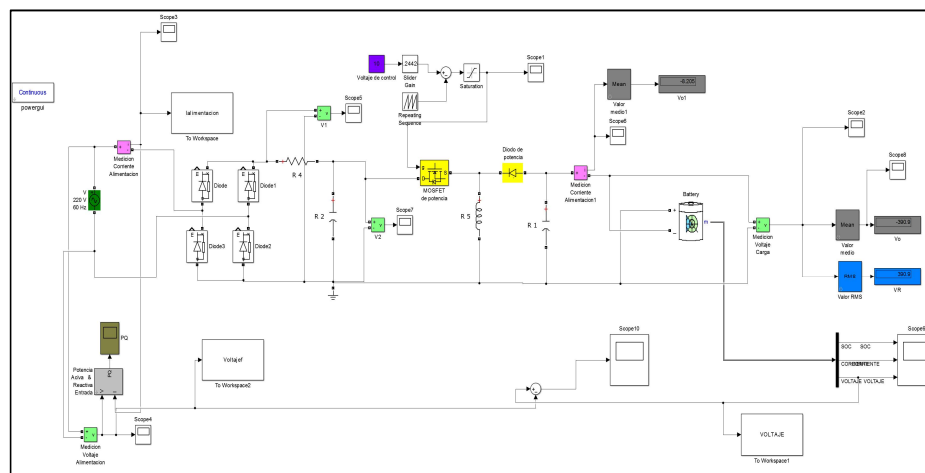


Figura 2.3: Diagrama de bloques del modelo de convertidor y batería con parámetros del Nissan 'LEAF'.

En ella se pueden identificar claramente los componentes del convertidor tipo puente rectificador seguido del convertidor DC/DC 'Buck Boost', para finalmente proveer a la batería de una corriente apta para su proceso de recarga.

Además de los diferentes bloques para la medición de las variables requeridas y en especial de la corriente de alimentación proveniente de la fuente, ya que esta señal es la que sufrirá los efectos de los armónicos y la que será analizada para obtener los porcentajes mencionados anteriormente.

2.2 Descripción del sistema.

La ciudadela 'Belo Horizonte' cuenta con una red de eléctrica de distribución subterránea conformada por 96 transformadores monofásicos tipo Pad-mounted que abastecen de energía a 1009 viviendas divididas en 9 etapas, de los cuales

para este estudio se tomaron en cuenta los primeros 40 transformadores de la red, los que se dividen en 14 de 50 KVA y 26 de 75 KVA de capacidad nominal. Estos transformadores se reparten entre las etapas 2, 5, 6, 7, 8 y 9 de Belo Horizonte.

El sistema cuenta con dos tipos de conductores, el AWG 2-15 KV para distribución y el AWG 336.4 mcm el cual conecta la ciudadela con la subestación de 18 MVA del mismo nombre.

2.2.1 Número de viviendas por transformador.

'Belo Horizonte' cuenta con un total de 1009 casas para 96 transformadores en las 9 etapas presentes en la ciudadela. De manera que obtenemos un promedio de 10 casas por transformador.

Como se mencionó anteriormente en este estudio fueron seleccionados un grupo de 40 transformadores lo que resulta aproximadamente con 400 viviendas.

2.2.2 Número de vehículos que se conectarán a la red.

El número de vehículos eléctricos considerados en este estudio es igual al número de vehículos a combustión que usan actualmente, el cual fue estimado en base a encuestas realizadas a los diferentes habitantes de las zonas estudiadas de la ciudadela. La encuesta contó de 3 preguntas concernientes a nuestro estudio:

1. ¿Cuántos vehículos poseen los miembros de esta casa?
2. ¿Cuántas horas al día, en promedio, usa(n) el(los) vehículo(s)?
3. ¿En qué horarios preferiría realizar la carga de su vehículo? Partiendo del supuesto que su vehículo sea 100% eléctrico.

Para la tercera pregunta se dieron 3 opciones: Mañana (6 am-12 pm), tarde (12 pm-7 pm) y noche (7 pm-6 am).

En base a las diferentes respuestas de los encuestados podemos estimar el número de vehículos presentes para el segmento de red analizada, como también la preferencia para los horarios de carga que tendrían los usuarios y que nos dan a conocer la coincidencia.

Los resultados tabulados son los siguientes como se muestra en las Tablas 2,3,4 y 5:

Pregunta 1:

Resultados	
Vehículos	Porcentaje
1	40%
2	54%
3 o más	6%
	100%

Tabla 2: Porcentajes de número de vehículos por familia en la zona de estudio de 'Belo Horizonte'.

Esto nos indica que las familias que habitan en la zona cuentan con al menos un vehículo, mientras que la mayoría utilizan 2 vehículos, estos porcentajes, teniendo en cuenta el número de casas del área analizada, nos servirán para poder estimar el número total de vehículos.

Pregunta 2:

Horas de uso	1	2	3	4	5	6
Lunes a viernes	11.9%	25%	30.95%	26.19%	3.57%	2.38%

Tabla 3: Porcentajes de horas de uso de los vehículos en la zona de estudio de 'Belo Horizonte'.

Las horas de uso de los vehículos según las encuestas nos dan una idea del tipo de uso que se le da a los vehículos, siendo mayoritariamente 3 horas, que implican traslados dentro de la ciudad y que en teoría son los recorridos a los que esta nueva tecnología apunta.

Pregunta 3:

Horarios		
6 am-12 pm	Mañana	1%
12 pm-7 pm	Tarde	32%
7 pm-6 am	Noche	67%

Tabla 4: Porcentajes de preferencia de horarios de carga en la zona de estudio de ‘Belo Horizonte’.

Finalmente, y de mucha importancia es el horario en el cual el usuario preferiría cargar su vehículo en su domicilio luego del uso diario que le da al mismo. Esto nos ayudará a determinar la coincidencia a la hora de conectar a la red los vehículos eléctricos.

Para estimar el número de vehículos se realizaron las siguientes consideraciones, las cuales se explicarán con ayuda de la Tabla 5 que se muestra a continuación:

Resultados			
Cantidad	Porcentaje	Vehículos	
(1)	(2)	(3)	
1	40%	160	
2	54%	432	
3	6%	72	
	100%	664	TOTAL DE VEHICULOS
		400	Mínimo de vehículos
		264	A distribuir

Tabla 5: Número de vehículos estimados para la zona de estudio de ‘Belo Horizonte’.

Considerando el número de casas por transformador (10 en promedio), tenemos un total de 400 casas dados nuestros 40 transformadores. Con lo mencionado en base a las respuestas de la pregunta 1 de las encuestas sabemos que existen al menos 400 casas en nuestro segmento de red, por lo que se procede a calcular de la siguiente manera:

$$\text{Vehículos (3)} = \text{Número de casas} * \text{Porcentaje (2)} * \text{Cantidad de vehículos (1)} \quad (2.1)$$

Así se estima que 664 vehículos es la cantidad total para las etapas analizadas, pero desconocemos su distribución. Para ello calculamos la cantidad de autos que faltan por distribuir, sabiendo que todas las familias cuentan con al menos uno en su propiedad, la cantidad a distribuir será de 264. La asignación de los vehículos por transformador se realizará de manera aleatoria por medio de un código en MATLAB, el cual se muestra a continuación en la Figura 2.4:

```

N=1;
T=zeros(40,1);
while(N<=264)
    u2=rand;
    for i=1:40
        if (u2>=(i*0.025-0.025)) && (u2<(i*0.025))
            T(i,1)=T(i,1)+1;
        end
    end
    N=N+1;
end

```

Figura 2.4: Código de asignación de vehículos para cada transformador de la red estudiada.

El cual consiste en:

Generar un vector de 40 casillas, cada una corresponde a un transformador y dos ciclos repetitivos que nos permiten llenar el vector:

- Ciclo 'WHILE' que se repetirá según el número de vehículos.
- Ciclo 'FOR' que recorre el vector.

Por cada aleatorio generado, el programa verifica el rango en el que se encuentra ubicado, ya que cada casilla (que representa a un transformador) cuenta con un rango de 0,025. Por ejemplo, la primera casilla cuenta con el rango [0 0,025), la segunda [0,025 0,05) y así sucesivamente. De esta manera se va acumulando de a 1 la casilla cuyo rango contiene al aleatorio generado. Esto se repite 264 veces que es el número total de vehículos.

Finalmente, para obtener el número de carros adicionales a cada transformador, se procede a sacar un promedio de 10 vectores generados por medio del código antes presentado, obteniendo los siguientes datos como se muestran en la Tabla 6:

Transformador	Autos	Transformador	Autos	Transformador	Autos	Transformador	Autos
1	16	11	17	21	17	31	17
2	16	12	17	22	17	32	18
3	17	13	16	23	16	33	17
4	17	14	16	24	15	34	18
5	16	15	15	25	16	35	16
6	17	16	19	26	18	36	16
7	18	17	16	27	17	37	18
8	16	18	16	28	15	38	16
9	16	19	16	29	17	39	18
10	17	20	17	30	16	40	15

Tabla 6: Número estimado de autos por transformador.

La Tabla 6 muestra el número de vehículos que serán considerados para obtener las curvas de carga que representen a los mismos, una por cada transformador.

2.2.3 Curvas de carga.

Carga residencial.

Para obtener la curva de carga diaria de los usuarios de 'Belo Horizonte' se tomaron los datos de mediciones del consumo eléctrico en KW de diferentes casas de la ciudadela, proporcionados por la CNEL GUAYAQUIL, de manera que se seleccionaron los datos para un mismo día (9 de agosto del 2016) de 10 usuarios distintos.

Estos datos se presentan como lecturas cada 15 minutos, de manera que tenemos 96 mediciones al día para cada medidor, que al sumarlas obtenemos la curva diaria de carga para un transformador. Esta curva nos servirá de base para generar el modelo de carga de los transformadores restantes tal como se muestra en la Figura 2.5.

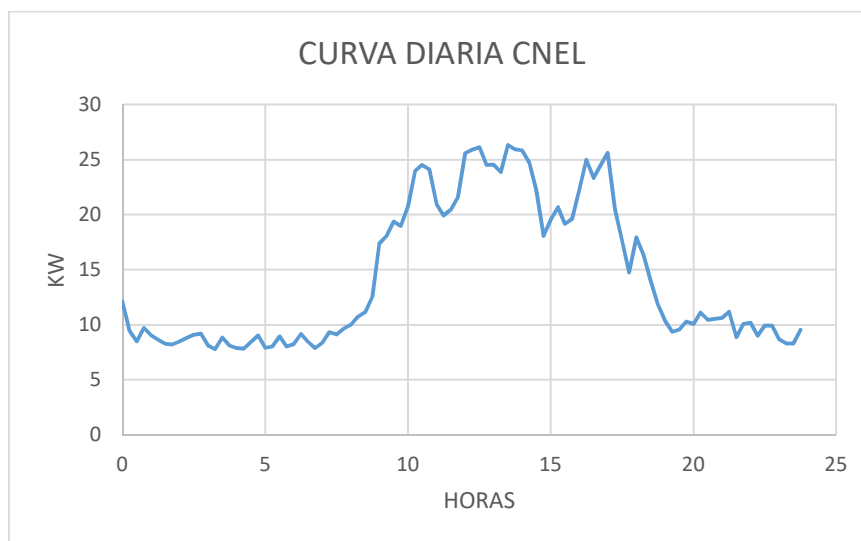


Figura 2.5: La curva de carga en base a datos reales proporcionados por CNEL EP.

La gráfica presentada previamente representa a las 96 mediciones realizadas a los 10 usuarios en conjunto, es decir la carga total que ve un transformador. Para poder generar las curvas restantes nos ayudamos de un código de MATLAB nuevamente, y las consideraciones que se tienen

para poder asumirlas como un modelo aproximado de lo que ocurre realmente en la red son los siguientes:

- Cargas netamente residenciales.
- Perfil de consumidores similares dada su condición económica.
- Tipos de vivienda similares.

Teniendo en cuenta estos factores, asumimos una variación aleatoria entre un rango de $\pm 15\%$ entre las mediciones de base, de manera que las curvas obtenidas en base al código que se muestra a continuación en la Figura 2.6 sean similares a la obtenida por datos reales, pero con ciertas variaciones aleatorias:

```

C=xlsread('curva.xls');
D=zeros(96,39);
for j=1:39
for i=1:96
u=rand;
if u>0.5
s=-1;
else
s=1;
end
if u>0.15
u=u/10;
end
D(i,j)=C(i,1)+s*u*C(i,1);
end
end

```

Figura 2.6: Código de generación de comportamiento de cargas aproximadas para cada transformador de la red estudiada.

El cual consiste en:

- Generar una matriz de 96x39 casillas, las columnas corresponden a cada curva generada que será útil para cada transformador, las mismas que cuentan con 96 mediciones cada una. Estas serán generadas a partir de los datos de la curva de carga obtenida por las mediciones proporcionadas por CNEL EP respetando los horarios en que fueron tomadas.
- Dos ciclos repetitivos 'FOR' que nos permiten llenar la matriz.
- Las mediciones aleatorias se generan con una probabilidad de que haya un aumento o disminución con respecto a la medición de base igual al 50% en cada caso.
- La variación se encuentra en un rango de [-15% 15%], designada de manera aleatoria para cada casillero de la matriz a generarse.

Una vez ejecutado el algoritmo obtenemos las mediciones estimadas correspondientes para cada uno de los 40 transformadores de 'Belo Horizonte'. A continuación en la Figura 2.7 se presenta una de las curvas generadas por las mediciones obtenidas:



Figura 2.7: Ejemplo de curva generada por el algoritmo.

Así podemos obtener el consumo total estimado por los usuarios conectados a estos 40 transformadores, sumando las mediciones de todas las curvas generadas, para así considerar los momentos en que se presentan los picos de carga y analizar posibles inconvenientes en cuanto a la cargabilidad, al momento de conectar los vehículos en la red.

Curvas de consumo por la conexión de vehículos.

Para obtener las curvas de carga que se generan a partir de los vehículos eléctricos nos servimos de las encuestas realizadas de los horarios de preferencia de carga de los usuarios, como también de las horas de uso.

Estimamos un promedio de carga de 4 horas, en algunos casos se consideran cargas de 8 horas y de manera constante. Las curvas de carga resultan de la suma de KVA's coincidentes por las diferentes recargas de los autos correspondientes a cada transformador, asumiendo un consumo constante de 1.2 KVA a un factor de potencia de 0.9 en atraso. Un ejemplo del tipo de curva para un vehículo eléctrico en base a estas consideraciones es mostrado en la Figura 2.8 la cual se muestra a continuación:

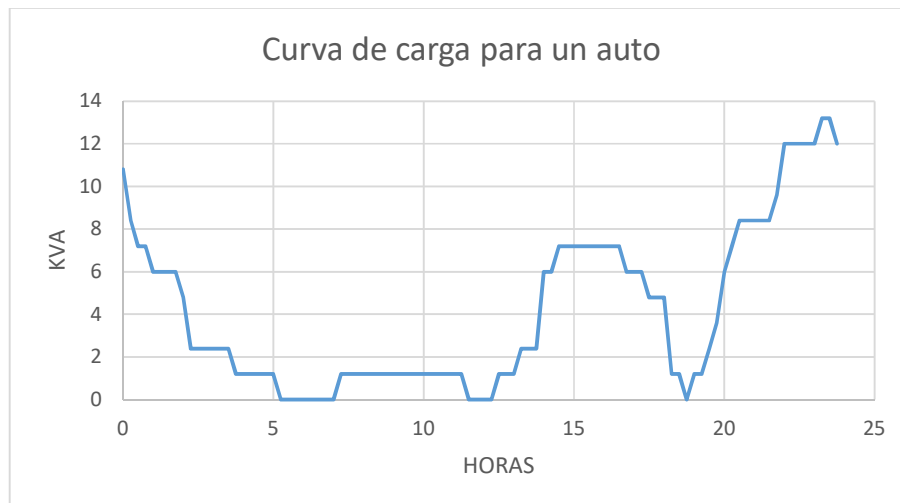


Figura 2.8: Curva de carga estimada para un vehículo eléctrico.

Finalmente, teniendo en cuenta las 40 curvas generadas para simular la carga de los vehículos eléctricos, obtenemos la curva total, sumando cada uno de los consumos en KVA, la misma que se muestra a continuación en la Figura 2.9:

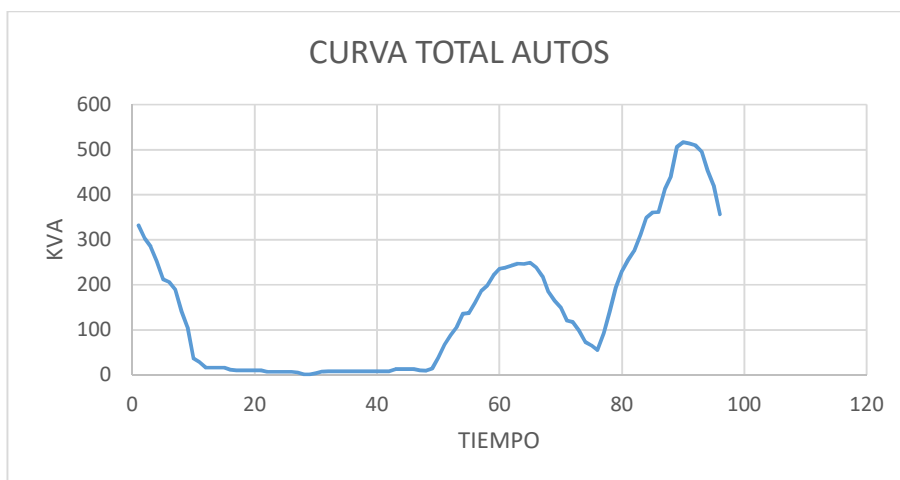


Figura 2.9: Curva de carga de todos los autos eléctricos estimados para la zona de estudio de 'Belo Horizonte'.

Una vez obtenida la curva de carga de los domicilios y autos podemos obtener la curva de carga total del sistema, estimando los KVA's necesarios al momento del ingreso de los autos eléctricos. Cabe recalcar que para nuestro estudio se consideró un ingreso abrupto en cuanto al número de EV's. La Figura 2.10 nos muestra la curva de carga esperada para este escenario:

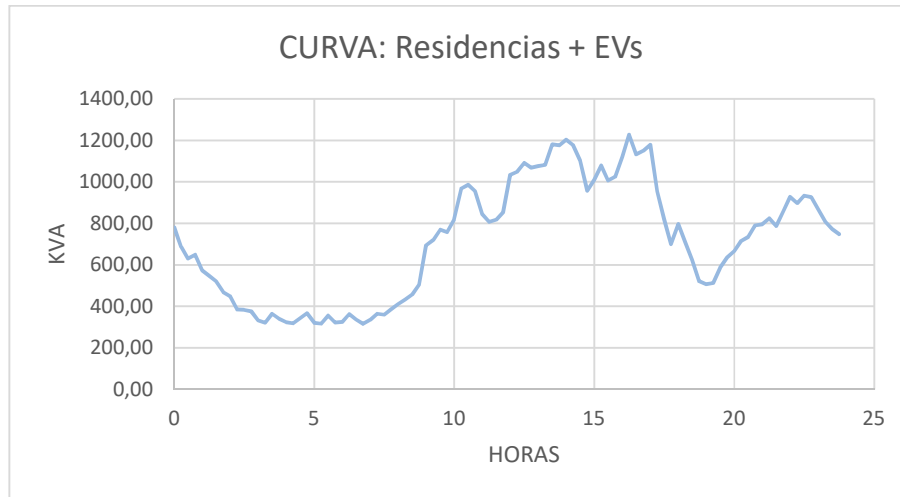


Figura 2.10: Curva resultante de carga para toda la zona de estudio de ‘Belo Horizonte’.

2.3 Simulación de la red en CYMDIST.

Para simular la red se utilizó el programa CYMDIST edición 8.0, en el cual se pudo levantar de manera completa la zona de la red seleccionada para este estudio, y se pudo utilizar un equivalente de thevenin el cual fue proporcionado por CNEL EP Guayaquil en la barra de 13.8 KV de la subestación para poder simular con más precisión el comportamiento del sistema.

Se agregaron los 40 transformadores monofásicos a la simulación cada uno con su carga dinámica monofásica que representan el consumo de energía en la hora pico de las viviendas durante cada 15 minutos durante 1 día.

Además, se colocó una carga concentrada que representa las etapas 1 y 3 de la ciudadela, ya que se encuentran cerca de la zona tomada para el estudio como se muestra a continuación en la Figura 2.11.

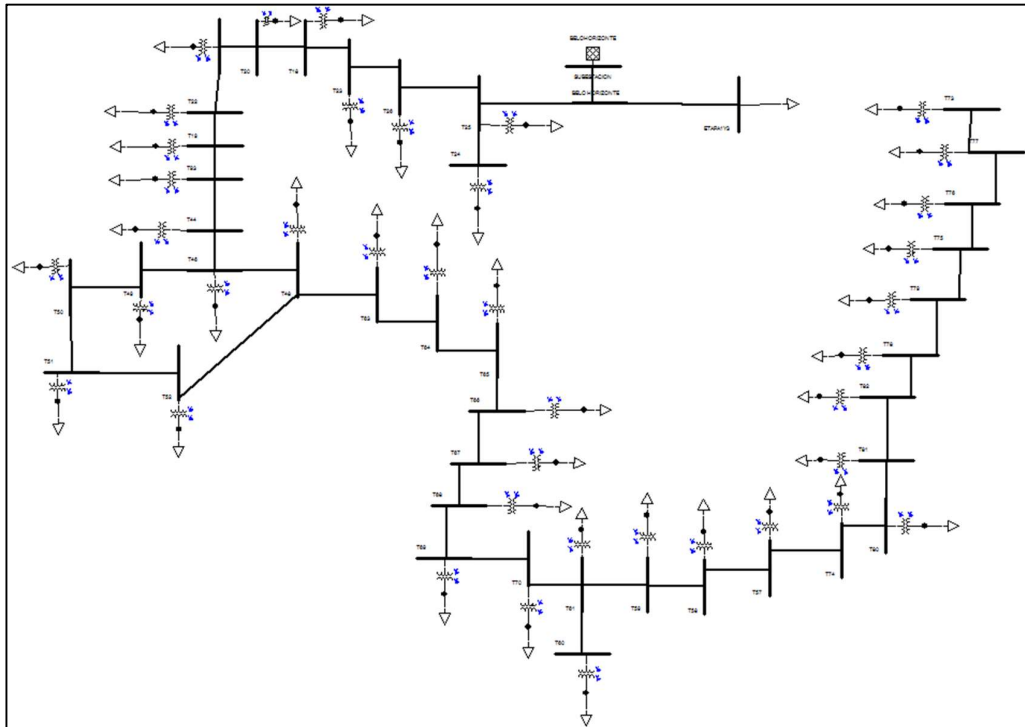


Figura 2.11: Red eléctrica de la ciudadela Belo Horizonte.

Simulación de la red incorporando vehículos eléctricos.

Para la simulación de la red incluyendo los vehículos eléctricos se agregó una carga dinámica a cada uno de los 40 transformadores monofásicos las cuales representan el consumo de energía del número total de vehículos por transformador, incluyendo su pico de carga y su correspondiente inyección de armónicos a la red como se muestra en la Figura 2.12.

Esto nos permitirá realizar una comparación y análisis del sistema eléctrico de la ciudadela más preciso gracias a los datos ya descritos anteriormente. Además de analizar todos los efectos que provoca la incorporación de los vehículos eléctricos a los diferentes elementos de la red.

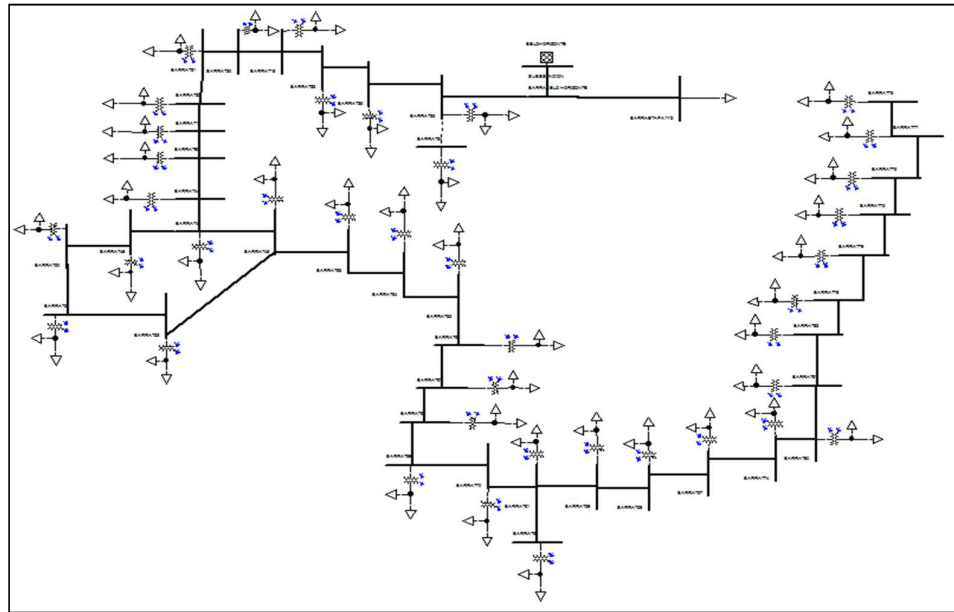


Figura 2.12: Red eléctrica de la ciudadela Belo Horizonte con vehículos eléctricos.

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de cada una de las simulaciones realizadas en las plataformas Matlab Simulink y CYMDIST. Se analizará el comportamiento del paquete de baterías y del convertidor, en términos de voltaje y corriente directa, procesos de carga, descarga y también la aportación de armónicos debido a la presencia de los componentes no lineales.

Finalmente, se proponen las soluciones pertinentes para controlar y mejorar de ser posible el funcionamiento de la red.

3.1 Paquete de baterías (Battery Pack).

La simulación de la batería en Matlab Simulink nos fue útil para comprender los valores de corriente y voltaje que maneja conforme al uso que se le dé. Hay que tener presente que estos valores son en corriente directa, y los resultados de esta sección no formarán parte del análisis posterior en la red. El modelo planteado y las curvas resultantes de carga y descarga nos sirven de guía para comparar el modelo más simple que se utiliza posteriormente junto con los convertidores.

El modelo consiste en el conjunto de módulos conectados en serie, alimentados por un generador de funciones que simula tanto la corriente de carga y descarga, como también el valor constante de la temperatura ambiente que interactúa con las celdas y módulos (considerada a 20 °C). A continuación en la Figura 3.1 se presentan las curvas resultantes para un intervalo de tiempo de 40000 segundos, escalando a lo que sería un proceso de carga convencional:

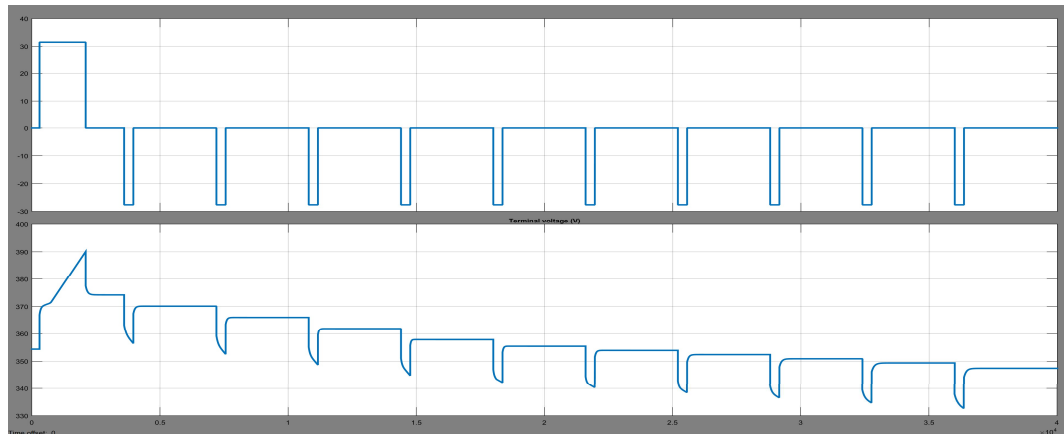


Figura 3.1: Gráficas de Corriente (superior) y Voltaje (inferior) del Pack de Baterías.

Como observamos en la gráfica de corriente, su parte positiva representa la corriente de carga, la cual tiene característica DC debido a que es entregada por el bloque de convertidores. Su parte negativa representa los momentos de uso, simulando la corriente entregada por la batería.

La manera lineal en la que el voltaje aumenta debido a la corriente de carga da la característica necesaria que debemos considerar para nuestra simulación posterior.

Es evidente la manera escalonada en la que el voltaje disminuye debido a los períodos de descarga, seguido por un periodo de estabilización cuando termina la circulación de corriente; en el cual el voltaje se estabiliza a un valor superior al que se encontraba mientras estaba en uso.

3.2 Resultados de la simulación del bloque de convertidores y su aportación de armónicos en la red.

Para disminuir los recursos necesarios de las herramientas computacionales para la simulación del bloque de convertidores, se utiliza un modelo de batería más simple al presentado anteriormente. Este modelo es utilizado principalmente para demandar la corriente desde la red hacia el bloque mencionado y así

conocer las corrientes que se generan tanto desde la red como de los convertidores.

Analizando la señal de corriente que provee la fuente y mediante el estudio de transformada rápida de Fourier (FFT) de armónicos de SimPowerSystems obtenemos el THD de la carga de los autos eléctricos. El resultado será aplicado a la carga que representan los autos en la red cuya característica de carga se muestra a continuación en la Figura 3.2:

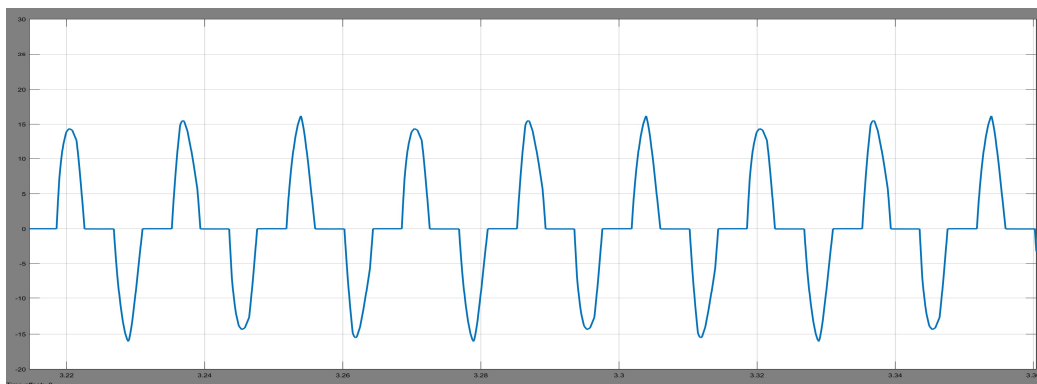


Figura 3.2: Curva de corriente de alimentación distorsionada por armónicos.

La simulación nos demuestra que los componentes no lineales presentes en cada uno de los autos generan una distorsión mayoritaria en el tercer armónico y un THD total de 61,66%. Este resultado se ajusta a los valores esperados tomando en cuenta referencias externas a este trabajo.

Este procedimiento se realizó para varios niveles de carga de la batería (SOC), a pasos de 10%, para corroborar si se efectuaba un cambio considerable dentro de los valores de distorsión de los tercer, quinto y séptimo armónicos. Demostrando que la variación puede ser despreciable se toma en cuenta para CYMDIST los niveles de armónicos a un SOC del 50%.

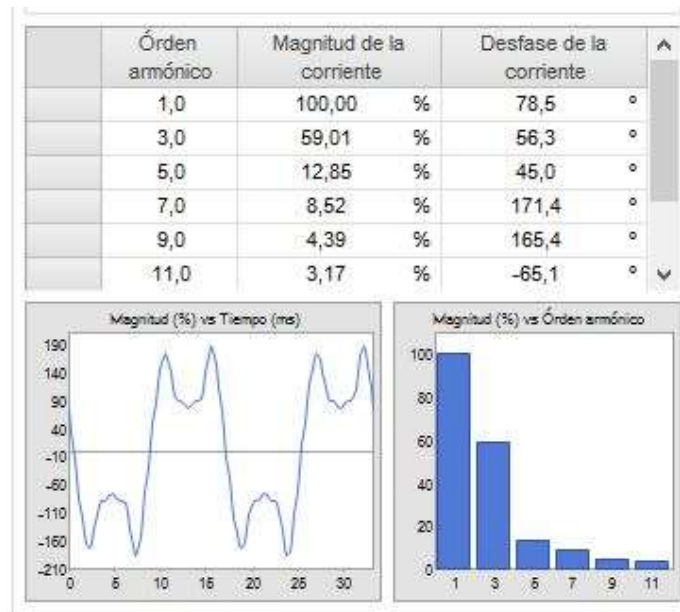


Figura 3.3: Porcentajes de distorsión según el orden de armónico.

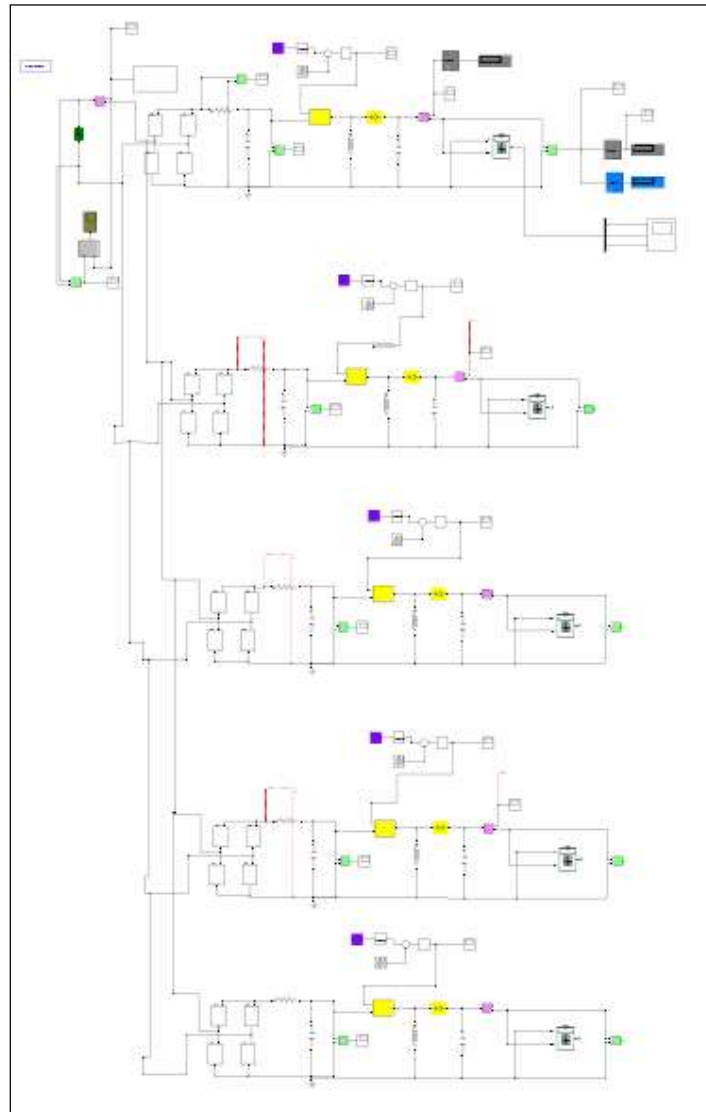


Figura 3.4: Simulación de 5 bloques de carga a diferentes SOC de las baterías.

De igual manera, al saber que no solo se conectará un vehículo a la red, sino varios de ellos, se realizó una prueba de 5 modelos de convertidores y baterías de iguales características (Figura 3.4), para determinar si los porcentajes de THD presentaban una variación considerable acorde al número de vehículos conectados en la red. Para este análisis las baterías se encontraban a diferentes niveles de carga. Los resultados se muestran en la Figura 3.5:

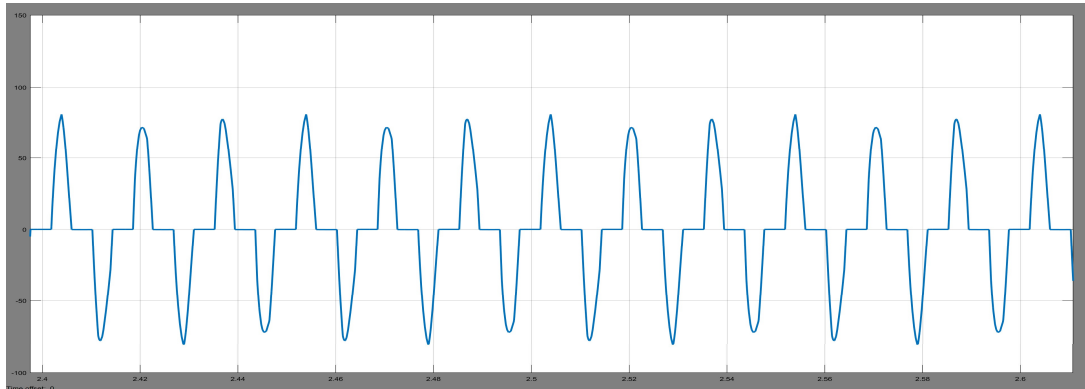


Figura 3.5: Corriente de alimentación para 5 vehículos, distorsionada por armónicos.

Observamos que la forma de la onda no varía, los valores de distorsión reflejan un cambio mínimo ($\text{THD}=61.67\%$), que no afectará a las propuestas de solución que presentamos previamente y serán puestas a prueba posteriormente.

Esto se debe a que se realiza la suma de 5 ondas de corriente de iguales características, que al sumarse únicamente ha variado su amplitud mas no ha tenido una variación de forma o frecuencia. Por lo que al comparar la diferencia porcentual que existe entre la onda de frecuencia fundamental (60 Hz) y los armónicos más significantes, esta se mantendrá a una razón similar a la que representa una sola onda.

En la Figura 3.6 se aprecia la característica armónica inyectada a la red por los vehículos eléctricos.

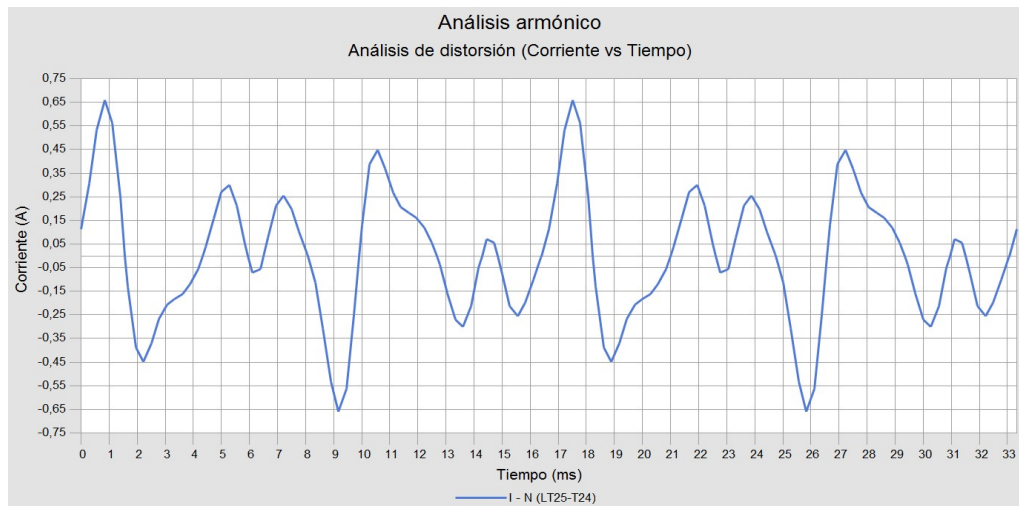


Figura 3.6: Corriente distorsionada en el neutro de la línea de distribución de los transformadores T25-T24.

3.3 Especificaciones y características tomadas de la red.

En la red tenemos transformadores y conductores que se encuentran sobre dimensionados con respecto a la carga dada por las residencias, zonas de recreación, luminarias, etc.

Gracias a esto nuestra red al momento de simular no muestra sobrecargas ni en transformadores ni conductores.

3.4 Simulación de la red actual en CYMDIST.

La simulación del sistema con su carga actual no muestra ninguna anomalía, no existe una variación significativa de voltaje ni corriente; además de que los transformadores y conductores se encuentran cargados a menos de la mitad de su capacidad nominal.

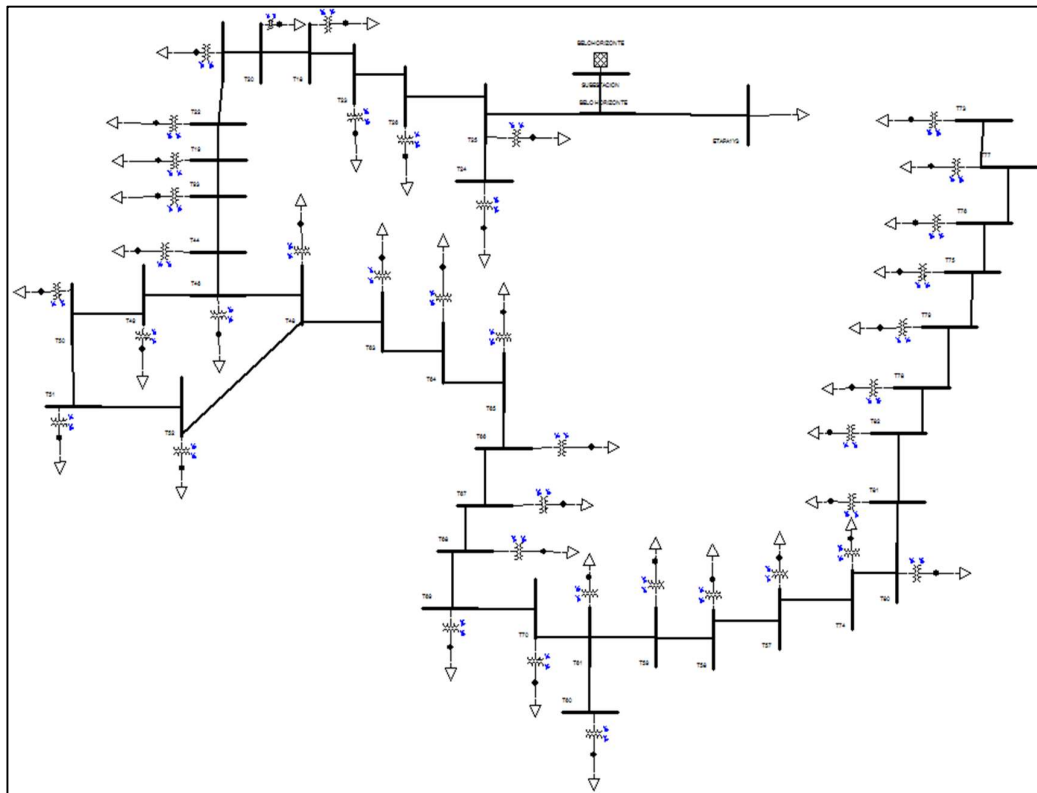


Figura 3.7: Red eléctrica de la ciudadela Belo Horizonte.

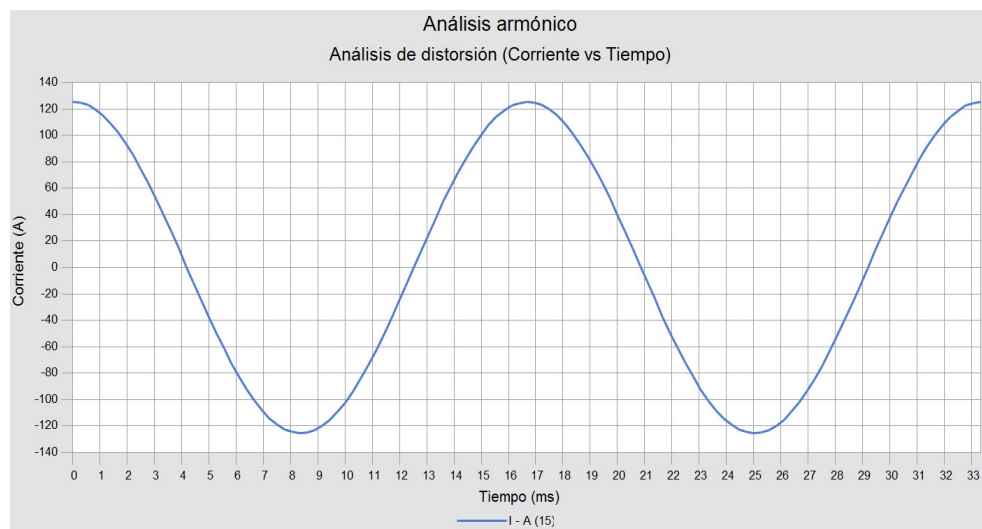


Figura 3.8: Perfil de corriente en la barra principal del sistema de la red con cargas domiciliarias.

3.5 Simulación de la red incorporando los autos eléctricos.

Para la simulación de la red incluyendo los vehículos eléctricos se agregaron cargas dinámicas a cada uno de los 40 transformadores monofásicos, las cuales representan el consumo de energía del número total de vehículos por transformador, incluyendo su pico de carga y su correspondiente inyección de armónicos a la red. Este sistema nos permitirá realizar una comparación y análisis del sistema eléctrico de la ciudadela más preciso gracias a los datos ya descritos anteriormente.

Además de ver todos los efectos que provoca la incorporación de los vehículos eléctricos a los diferentes elementos de la red.

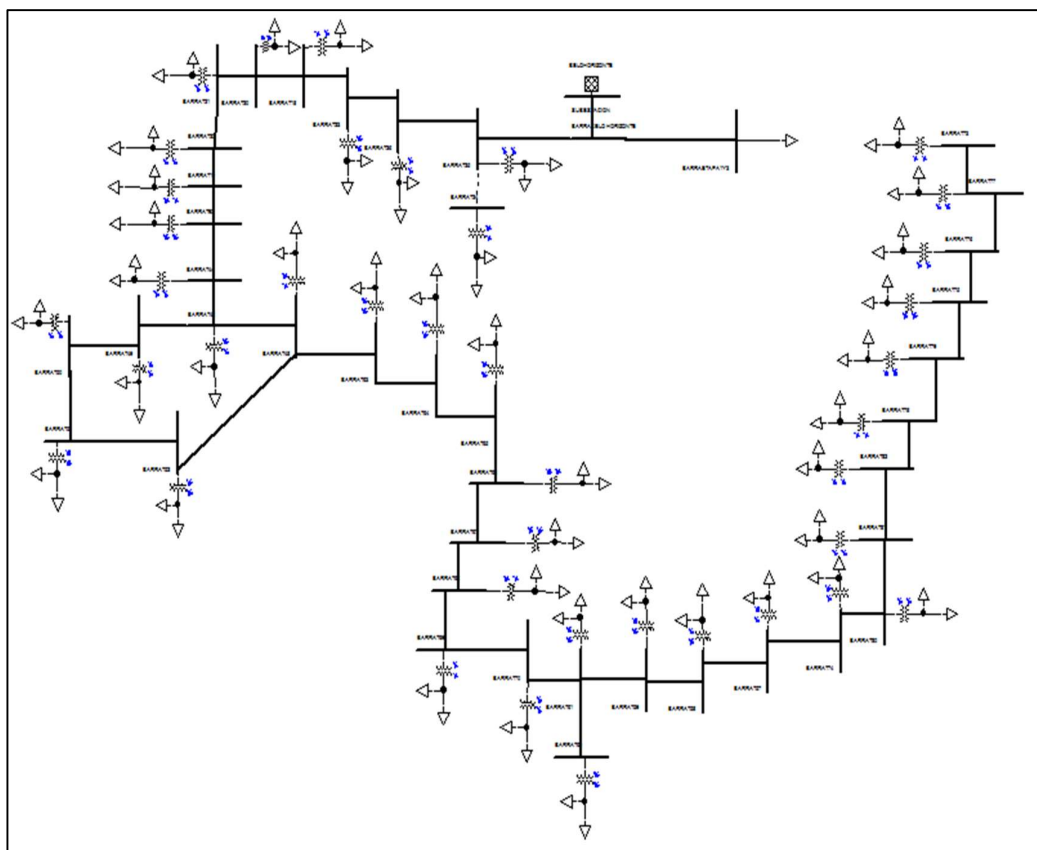


Figura 3.9: Red eléctrica de la ciudadela Belo Horizonte con vehículos eléctricos.

En la Figura 3.10 podemos apreciar los cuadros rojos que indican que el sistema se encuentra sobrecargado de armónicos en varias zonas de la red. Esto es provocado por la incorporación de los vehículos eléctricos en los domicilios, ya que estos inyectan un elevado nivel del orden de 3^{ro}, 5^{to} y 7^{mo} armónico, causando así fallas en la red por variación de voltajes y sobre todo corriente. Dicho elevado porcentaje de THD no cumple con la norma IEEE 519-2014 en casi la mitad del sistema para las 3 fases de los conductores. Este tipo de variaciones provoca un daño en la estructura del sistema, ya sea en transformadores como en conductores, causando quemas de equipos eléctricos a nivel doméstico, apagones debido a activaciones de protecciones de variaciones de voltaje o corriente, etc.

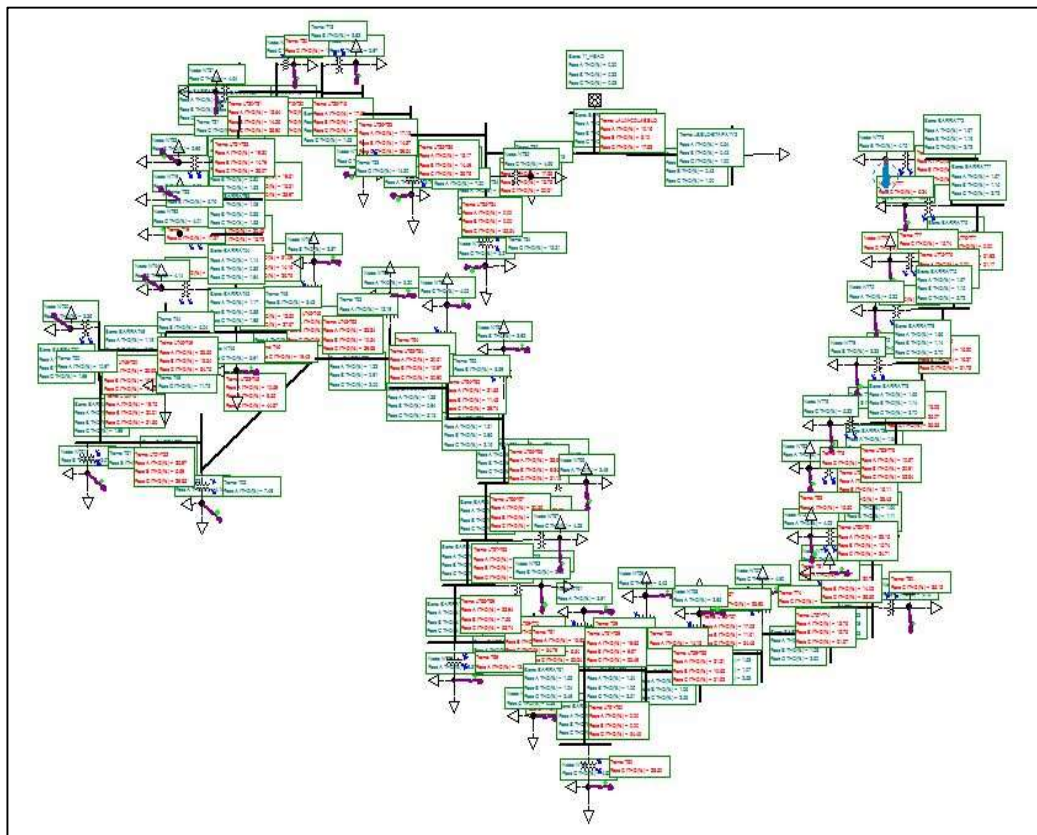


Figura 3.10: Simulación del sistema incorporando vehículos eléctricos en los secundarios de los transformadores.

Ya que el efecto de los armónicos varía mucho más en la corriente que en el voltaje como se muestra a continuación, basándose en el análisis de variación por armónicos de corriente y voltaje, y notando que la variación de voltaje es despreciable, se ha decidió realizar el análisis con énfasis en los perfiles de corriente.

Número de dispositivo	Corriente fund. (Amp)	180.00 Hz IHD (%)	300.00 Hz IHD (%)	420.00 Hz IHD (%)	540.00 Hz IHD (%)	660.00 Hz IHD (%)	THD (%)	KIT (kA)	ITIF	PCC	Isc/IL	TDD (%)
LALIM-CDLABELO-C	121	017	004	002	001	001	018	003	028	11_HEAD	095	018
LCDLABELO-T25-A	071	017	004	002	001	001	017	002	028	BARRABELC	111	017
LCDLABELO-T25-B	071	013	003	002	001	001	014	002	023	BARRABELC	111	014
LCDLABELO-T25-C	071	029	006	004	002	001	030	003	046	BARRABELC	111	030
LT18-T20-A	062	018	004	002	001	001	018	002	030	BARRAT18	081	018
LT18-T20-B	062	013	003	002	001	001	014	001	023	BARRAT18	081	014
LT18-T20-C	062	029	006	004	002	001	030	003	045	BARRAT18	081	030
LT19-T93-A	055	020	004	003	001	001	020	002	033	BARRAT19	079	020
LT19-T93-B	055	013	003	002	001	001	014	001	023	BARRAT19	079	014
LT19-T93-C	055	027	006	004	002	001	028	002	042	BARRAT19	079	028
LT20-T21-A	061	018	004	002	001	001	019	002	031	BARRAT20	078	019
LT20-T21-B	061	014	003	002	001	001	014	001	024	BARRAT20	078	014
LT20-T21-C	061	028	006	004	002	001	029	003	044	BARRAT20	078	029
LT21-T22-A	059	018	004	003	001	001	019	002	031	BARRAT21	079	019
LT21-T22-B	059	014	003	002	001	001	015	001	024	BARRAT21	079	015
LT21-T22-C	059	027	006	004	002	001	028	003	043	BARRAT21	079	028
LT22-T19-A	057	019	004	003	001	001	020	002	032	BARRAT22	079	020
LT22-T19-B	057	013	003	002	001	001	013	001	022	BARRAT22	079	013
LT22-T19-C	057	028	006	004	002	001	029	003	044	BARRAT22	079	029
LT23-T18-A	064	017	004	002	001	001	018	002	029	BARRAT23	083	018
LT23-T18-B	064	015	003	002	001	001	015	002	025	BARRAT23	083	015
LT23-T18-C	064	028	006	004	002	001	029	003	044	BARRAT23	083	029
T19-C	005	017	004	002	001	001	017	000	028	BARRAT19	835	017
T19-N	005	017	004	002	001	001	017	000	028			
T20-C	005	015	003	002	001	001	016	000	025	BARRAT20	871	016
T20-N	005	015	003	002	001	001	016	000	025			
T21-C	005	010	002	001	001	000	011	000	017	BARRAT21	884	011

Figura 3.11: Porcentaje de THD en el sistema con vehículos eléctricos.

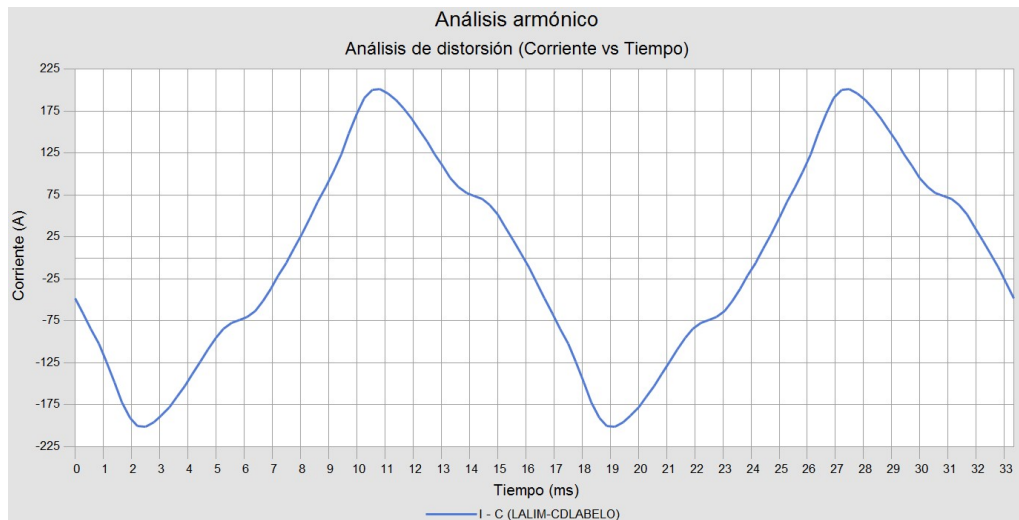


Figura 3.12: Perfil de corriente de la Fase C de la línea principal del sistema sin filtros de armónicos.

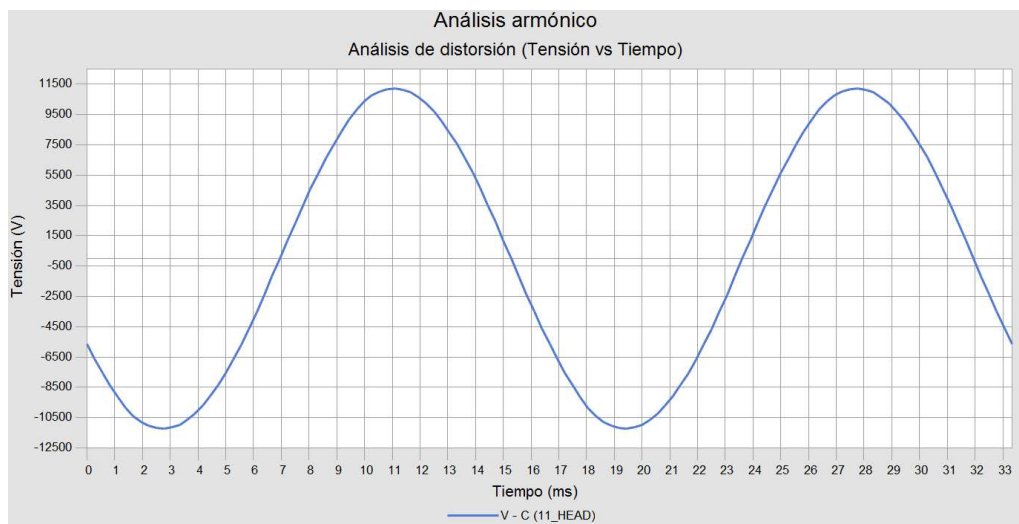


Figura 3.13: Perfil de voltaje de la Fase C de la barra principal del sistema sin filtros de armónicos.

3.6 Análisis de propuestas.

Opción 1: Sistema con vehículos eléctricos y filtros en las barras del sistema.

Esta opción propone agregar filtros de armónicos de doble fase con una capacidad de 200 KVAR en ciertas barras del sistema para amortiguar el incremento del THD provocado por los vehículos eléctricos. Sin embargo, este método no logra llevar el THD al porcentaje requerido, el cual se encuentra definido por la norma IEEE 519-2014, y provoca un sobre voltaje en algunas barras de la red (se aprecia de color verde); además del gran costo económico que refleja instalarlos en el sistema. Por lo tanto, esta no es una opción a considerar para filtrar los armónicos.

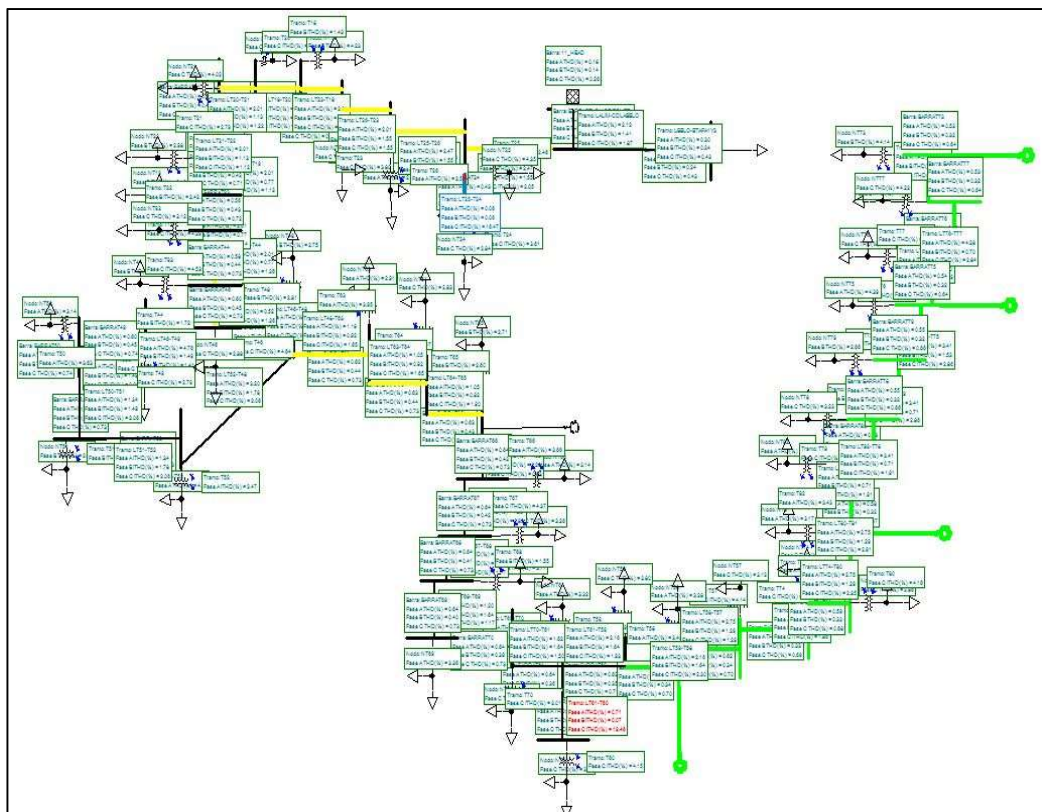


Figura 3.14: Sistema con filtros de doble fase en cinco barras del sistema.

Opción 2: Filtro RC en los terminales del puente de diodos.

A fin de mitigar la presencia de armónicos en la red, analizamos la propuesta de realizar una modificación en el cargador de los vehículos. De esta manera los armónicos serían filtrados desde el momento en que son generados por el vehículo.

Para los valores de resistencia y capacitancia se realizaron variaciones a partir de los valores que fueron tomados en cuenta para limitar la corriente y voltaje de salida del convertidor AC/DC, controlando que la corriente de alimentación se mantenga en los límites deseados, aunque con una forma de onda diferente debido a que se espera una distorsión menor.

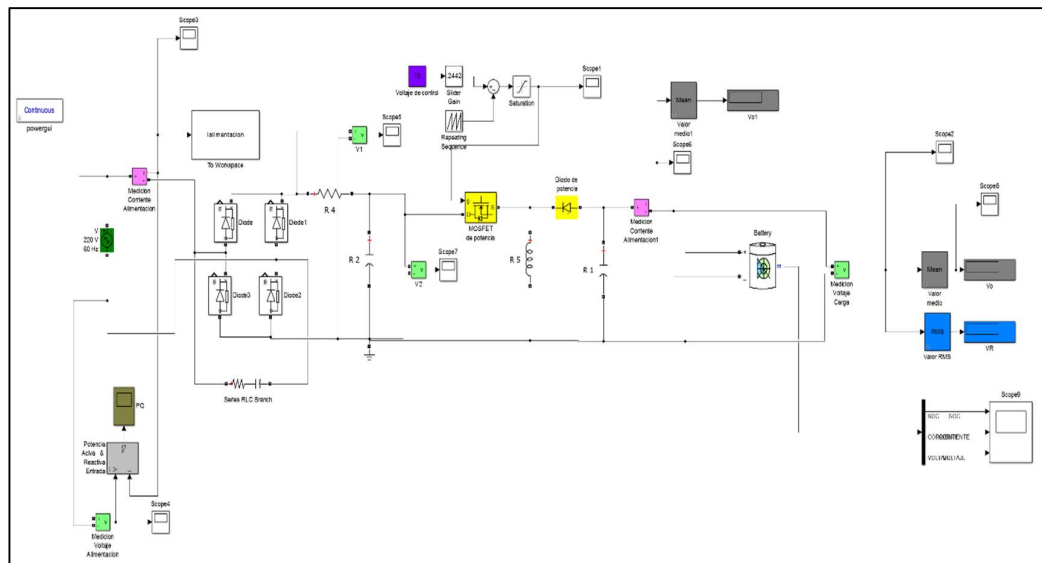


Figura 3.15: Aplicación de filtro RC en paralelo al puente rectificador.

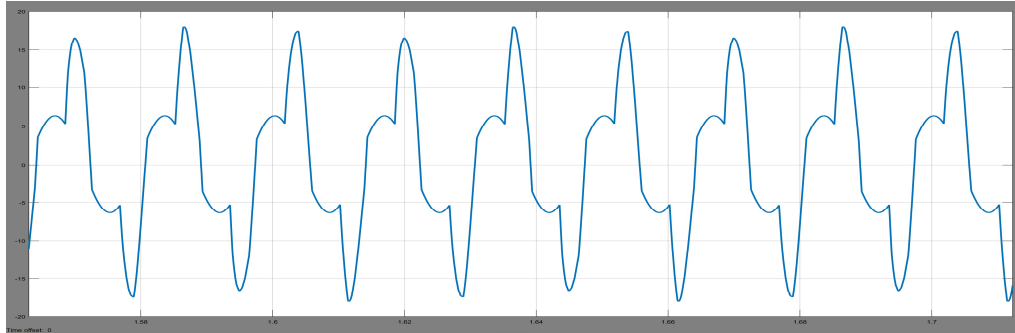


Figura 3.16: Corriente de alimentación distorsionada por armónicos, utilizando un filtro RC.

A pesar de que el filtro aplicado busca amortiguar los armónicos en la red, vemos claramente una distorsión en la alimentación, lo cual se demuestra al ejecutar el análisis FFT de Matlab, el cual nos muestra un porcentaje de terceros armónicos de 44.04% tal como se puede apreciar en la Figura 3.16.

La aplicación del filtro nos ayuda a reducir en aproximadamente un 20% la distorsión total THD, alcanzando un 46,03% y un descenso similar en el tercer armónico. A pesar de ello seguimos teniendo un nivel alto de distorsión, y debido a que en esta opción es necesario realizar una modificación certificada por el fabricante previo a la adquisición por parte del cliente, resulta ser poco viable, ya que los beneficios no son lo suficientemente altos para la complejidad de la propuesta.

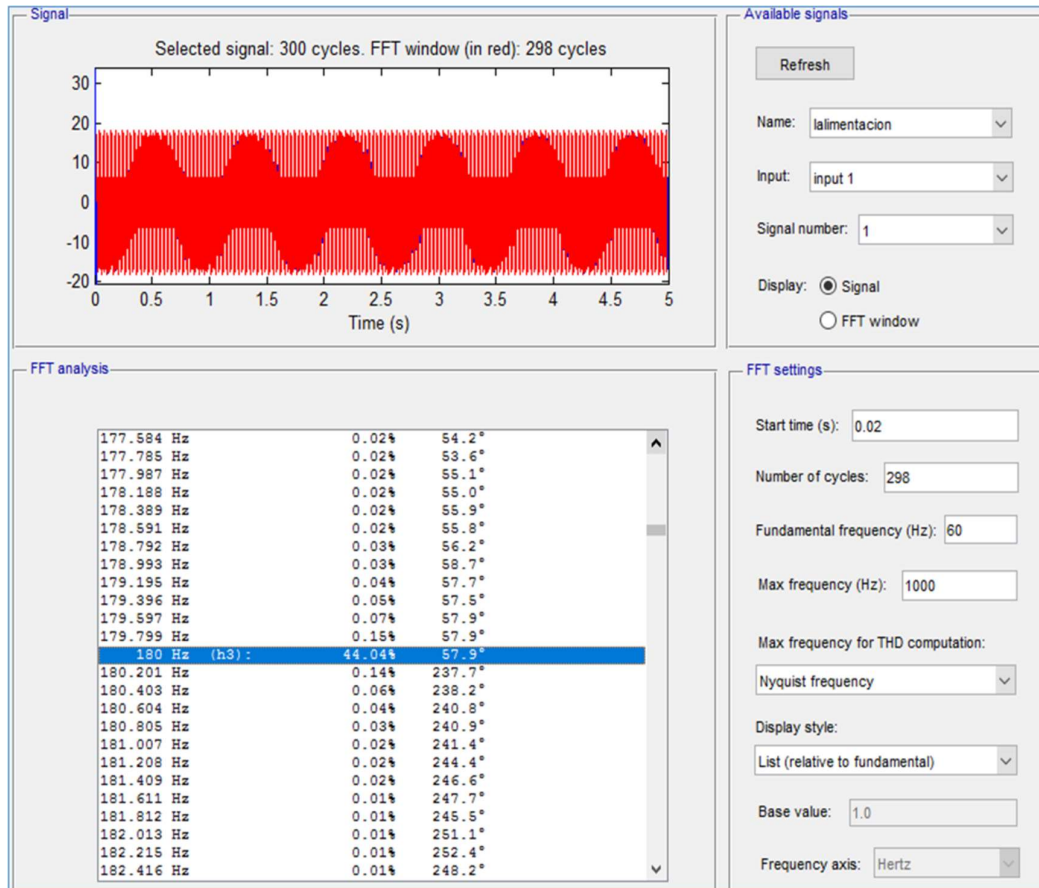


Figura 3.17: Resultado del análisis FFT analizando la señal de corriente de la Figura 3.16.

Opción 3: Sistema con vehículos eléctricos y filtros de armónicos en el secundario de los transformadores.

En esta opción se insertaron filtros de armónicos de fase simple en los secundarios de los transformadores del sistema con vehículos eléctricos y carga domiciliaria. Podemos observar que el porcentaje de THD en todo el sistema disminuyó considerablemente gracias a estos filtros cumpliendo así con la norma IEEE 519-2014, además el voltaje y la corriente no sufren de una variación muy elevada, permitiendo que el sistema funcione correctamente sin fallas en sus elementos. Por todo esto se considera a opción como la más viable para nuestro trabajo.

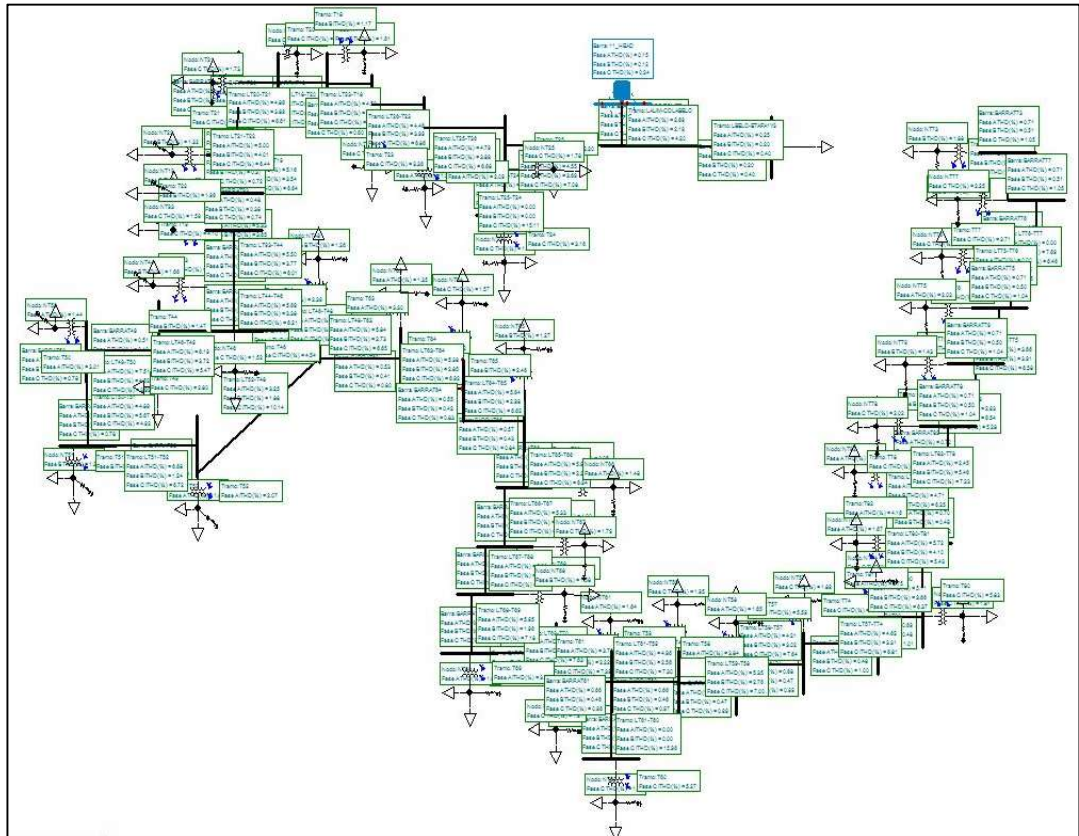


Figura 3.18: Sistema eléctrico con filtros de armónicos en el secundario de los transformadores.

Así mismo, con CYMDIST se pudo analizar la corriente en la fase C de la línea y del sistema, teniendo un perfil con menos variación gracias a los filtros de armónicos tal como se muestra a continuación en la Figura 3.19 y Figura 3.20:

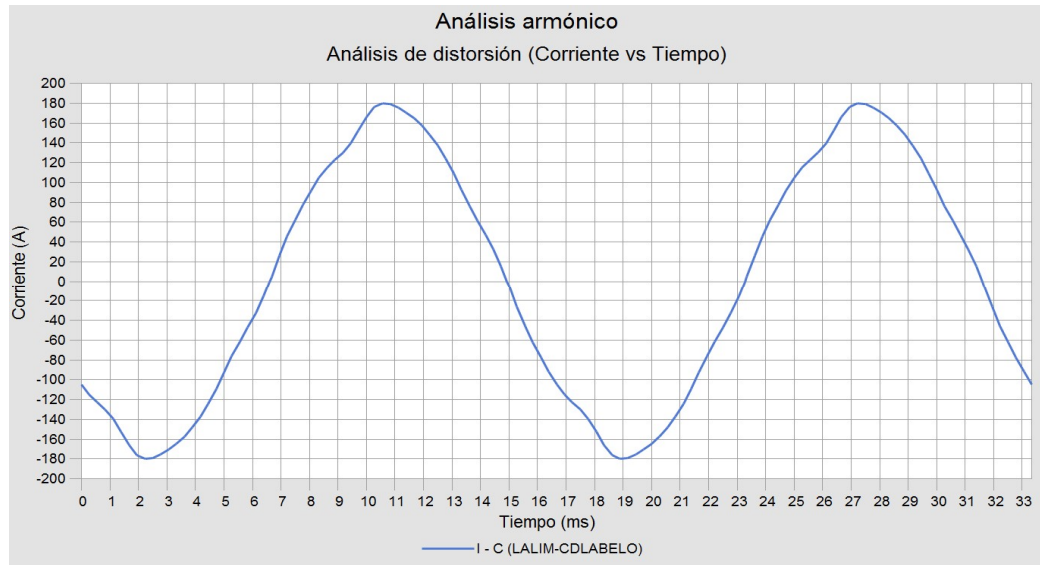


Figura 3.19: Perfil de corriente de la fase c en la línea principal del sistema con filtros de armónicos.

Número de dispositivo	Corriente fund. (Amp)	180.00 Hz IHD (%)	300.00 Hz IHD (%)	420.00 Hz IHD (%)	540.00 Hz IHD (%)	660.00 Hz IHD (%)	THD (%)	KIT (kA)	ITIF	PCC	Isc/IL	TDD (%)
LALIM-CDLABELO-A	122	002	002	001	001	000	003	002	014	11_HEAD	094	003
LALIM-CDLABELO-B	122	001	001	001	000	000	002	001	011	11_HEAD	094	002
LALIM-CDLABELO-C	122	002	003	002	001	001	004	003	023	11_HEAD	094	004
LBELO-ETAPA1Y3-C	050	000	000	000	000	000	000	000	004	BARRABELC	157	000
LCDLABELO-T25-A	072	003	003	002	001	001	005	002	024	BARRABELC	109	005
LCDLABELO-T25-B	072	002	002	001	001	001	004	001	019	BARRABELC	109	004
LCDLABELO-T25-C	072	004	004	003	002	001	007	003	038	BARRABELC	109	007
LT18-T20-A	063	003	003	002	001	001	005	002	025	BARRAT18	080	005
LT18-T20-B	063	003	002	001	001	001	004	001	019	BARRAT18	080	004
LT18-T20-C	063	004	004	003	001	001	007	002	037	BARRAT18	080	007
LT19-T93-A	056	003	003	002	001	001	005	002	028	BARRAT19	078	005
LT19-T93-B	056	002	002	001	001	001	004	001	019	BARRAT19	078	004
LT19-T93-C	056	004	004	003	001	001	006	002	035	BARRAT19	078	006
LT20-T21-A	061	003	003	002	001	001	005	002	025	BARRAT20	077	005
LT20-T21-B	061	003	002	002	001	001	004	001	020	BARRAT20	077	004
LT20-T21-C	061	004	004	003	001	001	007	002	036	BARRAT20	077	007
LT21-T22-A	060	003	003	002	001	001	005	002	026	BARRAT21	078	005
LT21-T22-B	060	003	002	002	001	001	004	001	020	BARRAT21	078	004
LT21-T22-C	060	004	004	003	001	001	006	002	035	BARRAT21	078	006
LT22-T19-A	058	003	003	002	001	001	005	002	027	BARRAT22	078	005
LT22-T19-B	058	002	002	001	001	001	004	001	018	BARRAT22	078	004
LT22-T19-C	058	004	004	003	001	001	007	002	036	BARRAT22	078	007

Figura 3.20: Porcentaje de THD en el sistema incorporando filtros en el secundario de los transformadores.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base a las simulaciones realizadas en el sistema, se observa que la cargabilidad de las líneas y transformadores no presentan inconvenientes de sobrecarga. Hay que tener en cuenta que, al momento de realizar el flujo de carga, el programa considera los picos de ambas cargas ingresadas, es decir, toma el pico de la carga residencial (alrededor de las 13:30) junto con el pico de la carga que representan los autos (alrededor de las 20:00), analizando así el peor de los casos para la red. Con estos antecedentes se puede asegurar que las instalaciones eléctricas a nivel de distribución en la ciudadela Belo Horizonte, en términos de cargabilidad, están aptas para el ingreso de los autos eléctricos.

Los armónicos generados por la carga de los vehículos degradan la vida útil de los equipos instalados. De acuerdo al análisis realizado en este trabajo es necesaria la aplicación de filtros domiciliarios o por transformador. Esta decisión debe ser tomada luego de un análisis técnico-económico por parte de las instituciones pertinentes.

Los perfiles de carga de los autos eléctricos permiten un mejor entendimiento de la importancia de la coincidencia del consumo. Además de mostrar las preferencias de los usuarios al momento de realizar las recargas y como esto implica un impacto negativo en la red.

A pesar del incremento considerable de la demanda, considerando un ingreso brusco de esta nueva tecnología en la red, la red de Belo Horizonte que fue analizada actualmente no requiere modificaciones. Requeriría únicamente, la mitigación de la distorsión que los vehículos aportan a la red.

Es necesario que las instituciones pertinentes activen campañas de información a los usuarios con respecto a las nuevas tecnologías de vehículos que existen. Las diferentes formas de carga, sus beneficios e inconvenientes en la red. Impulsar planes de instalaciones de puntos especiales en las viviendas, destinados únicamente a la carga de vehículos y las ventajas que le proveen al consumidor. Ya que las recargas más eficientes son a niveles de voltaje superior y los cargadores son accesorios no

incluidos en la venta de los vehículos, estos inclusive requieren de una acometida exclusiva para estos puntos dados los altos niveles de corriente que demandan.

En base a los resultados obtenidos, teniendo en cuenta el perfil del consumidor ecuatoriano al momento del uso de sus instalaciones eléctricas y de elegir como una mejor alternativa el uso de filtros domiciliarios, se debe incluir al mismo dentro de la transacción de los vehículos o dar las facilidades pertinentes para su adquisición, para prever las distorsiones que estas tecnologías pueden generar.

Los vehículos eléctricos representan una interesante alternativa para solucionar los problemas de movilidad, contaminación y a su vez la disminución de los costos de mantenimiento en comparación a sus similares que usan motores de combustión interna.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. G. Córdoba , Factibilidad para la integración de vehículos eléctricos al Sistema de distribución eléctrico, Quito: Universidad Politécnica Salesiana, 2015.
- [2] J. D. Torres Sarmiento, Estudio de viabilidad en la implementación de vehículos eléctricos en la ciudad de Cuenca., Cuenca: Universidad Politecnica Salesiana, 2015.
- [3] M. Yilmaz y P. T. Krein, Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles, IEEE, 2013.
- [4] AAVER, Tipos de conectores, Tipos de Recarga y Modos de Carga, Argentina: Asociacion Argentina de vehículos eléctricos y alternativos, 2013.
- [5] Viakron, «Sistema y redes de distribución Capitulo 4,» de *Manual Eléctrico Viakon*.
- [6] R. Berrizo, Armónicos en la red eléctrica generados por vehículos eléctricos, U.T.N. Rosario, 2013.
- [7] Nissan, «Datos técnicos de la batería del Nissan Leaf,» Nissan.
- [8] L. Cao, H. Li y H. Zhang, Model-free power control of front-end PFC AC/DC converter for on-board charger, China: College of electrical engineering and automation Hefei University of Technology, 2016.
- [9] M. A. S. Farooqui y J. Valsadia, Design and simulation of DC/DC converter in interface with ESS and VSI, Canada: University of Waterloo, 2013.
- [10] M. Einhorn, F. V. Conte, C. Kral y J. Fleig, Comparison, selection, and parameterization of electrical battery models for automotive applications, IEEE, 2013.

ANEXOS

ANEXO 1

Datos de carga brindado por CNEL EP UN Guayaquil de un transformador durante un día entero de la ciudadela Belo Horizonte.

Hora	Carga	Hora	Carga	Hora	Carga	Hora	Carga
0:00:00	12.12	7:00:00	8.38	14:00:00	25.85	21:00:00	10.61
0:15:00	9.45	7:15:00	9.34	14:15:00	24.72	21:15:00	11.20
0:30:00	8.47	7:30:00	9.11	14:30:00	22.22	21:30:00	8.88
0:45:00	9.72	7:45:00	9.66	14:45:00	18.07	21:45:00	10.08
1:00:00	9.06	8:00:00	10.01	15:00:00	19.56	22:00:00	10.18
1:15:00	8.64	8:15:00	10.73	15:15:00	20.68	22:15:00	8.99
1:30:00	8.25	8:30:00	11.14	15:30:00	19.15	22:30:00	9.92
1:45:00	8.22	8:45:00	12.56	15:45:00	19.63	22:45:00	9.94
2:00:00	8.49	9:00:00	17.39	16:00:00	22.25	23:00:00	8.68
2:15:00	8.82	9:15:00	18.05	16:15:00	25.00	23:15:00	8.29
2:30:00	9.07	9:30:00	19.38	16:30:00	23.32	23:30:00	8.28
2:45:00	9.19	9:45:00	18.97	16:45:00	24.53	23:45:00	9.56
3:00:00	8.10	10:00:00	20.73	17:00:00	25.62		
3:15:00	7.78	10:15:00	23.97	17:15:00	20.47		
3:30:00	8.84	10:30:00	24.51	17:30:00	17.59		
3:45:00	8.11	10:45:00	24.10	17:45:00	14.75		
4:00:00	7.88	11:00:00	20.98	18:00:00	17.96		
4:15:00	7.82	11:15:00	19.92	18:15:00	16.31		
4:30:00	8.42	11:30:00	20.45	18:30:00	14.04		
4:45:00	9.03	11:45:00	21.58	18:45:00	11.87		
5:00:00	7.92	12:00:00	25.60	19:00:00	10.38		
5:15:00	8.01	12:15:00	25.89	19:15:00	9.35		
5:30:00	8.96	12:30:00	26.14	19:30:00	9.56		
5:45:00	8.03	12:45:00	24.54	19:45:00	10.28		
6:00:00	8.22	13:00:00	24.56	20:00:00	10.07		
6:15:00	9.15	13:15:00	23.86	20:15:00	11.10		
6:30:00	8.46	13:30:00	26.33	20:30:00	10.46		
6:45:00	7.89	13:45:00	25.95	20:45:00	10.53		

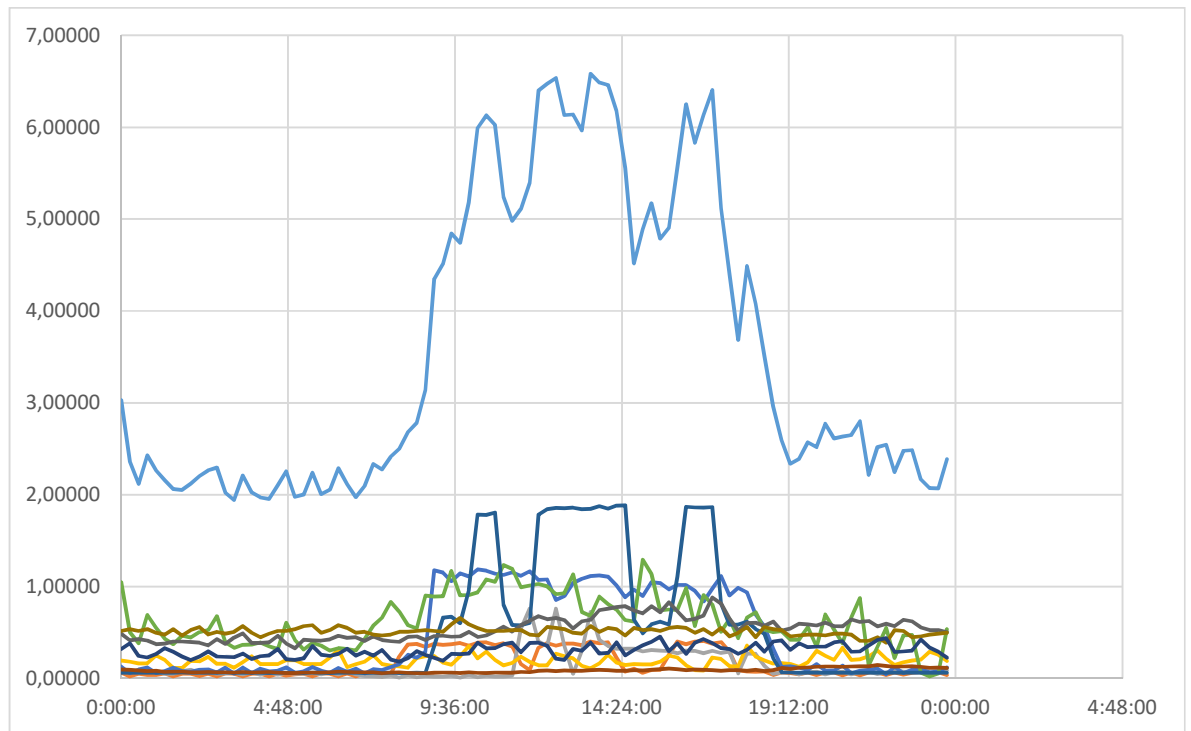


Figura A.1 Curva de carga diaria para un transformador, junto con las 10 curvas de los consumos de los usuarios del día 9 de agosto del 2016. En base a la información proporcionada por CNEL.

ANEXO 2

Resumen de carga en intervalos de 4 horas de los vehículos eléctricos en cada transformador.

Transformador	0:00	4:00	8:00	12:00	16:00	20:00	23:45:00
T1	7.2	0	0	2.4	4.8	7.2	7.2
T2	6	0	0	1.2	4.8	9.6	7.2
T3	7.2	0	0	0	6	7.2	8.4
T4	6	0	0	0	6	8.4	7.2
T5	7.2	0	0	1.2	6	7.2	7.2
T6	6	0	0	1.2	4.8	9.6	7.2
T7	7.2	0	0	2.4	4.8	7.2	7.2
T8	7.2	0	0	1.2	6	7.2	7.2
T9	7.2	0	0	1.2	4.8	7.2	8.4
T10	7.2	0	0	1.2	6	6	7.2
T11	7.2	0	0	1.2	6	7.2	8.4
T12	7.2	0	0	0	6	6	7.2
T13	7.2	0	0	0	6	7.2	8.4
T14	7.2	0	0	0	7.2	7.2	7.2
T15	7.2	0	0	0	7.2	7.2	8.4
T16	7.2	0	0	0	7.2	7.2	8.4
T17	7.2	0	1.2	0	7.2	7.2	7.2
T18	7.2	0	0	0	7.2	7.2	7.2
T19	7.2	0	0	0	6	4.8	7.2
T20	7.2	0	0	0	6	4.8	8.4
T21	7.2	0	1.2	0	6	4.8	8.4
T22	7.2	0	0	0	6	4.8	8.4
T23	8.4	0	0	0	7.2	7.2	8.4
T24	7.2	0	0	0	6	7.2	8.4
T25	7.2	0	0	2.4	4.8	7.2	7.2
T26	7.2	0	0	1.2	6	7.2	7.2
T27	7.2	0	0	1.2	4.8	7.2	8.4
T28	7.2	0	0	1.2	6	6	7.2
T29	7.2	0	0	1.2	6	7.2	8.4
T30	7.2	0	0	0	6	6	7.2
T31	7.2	0	0	0	6	7.2	8.4
T32	7.2	0	0	0	7.2	7.2	7.2
T33	7.2	0	0	0	7.2	7.2	8.4
T34	7.2	0	0	0	7.2	7.2	8.4
T35	7.2	0	0	0	7.2	7.2	7.2
T36	7.2	0	0	0	7.2	7.2	7.2
T37	7.2	0	0	0	6	4.8	7.2

T38	7.2	0	1.2	0	6	4.8	8.4
T39	7.2	0	0	0	6	4.8	8.4
T40	7.2	0	0	0	6	4.8	8.4

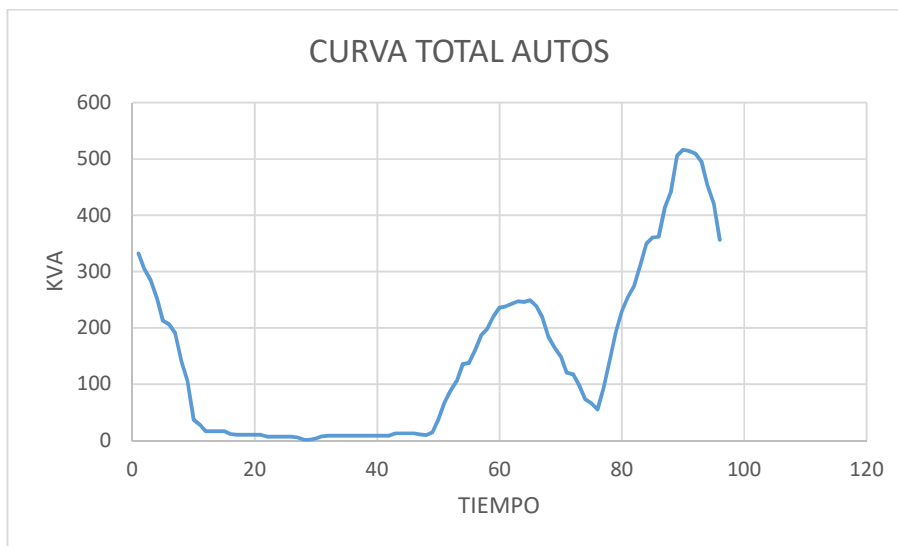


Figura A.2 Curva de carga para el total de vehículos considerados para el estudio.

ANEXO 3

Equivalente de thevenin en la barra de 13.8KV de la subestación Belo Horizonte proporcionado por CNEL EP UN Guayaquil.

ANSI Short-Circuit - Faulted Bus Summary		
Parameters		
Date	Thu Nov 24 2016	
Time	11h13m33s	
Project Name	Subestación Horizonte	Belo
Faulted Bus	SBHOR13.8-1	
Duty Type	Time Delayed	
Fault Type	All	
Faulted Phases	Default	

Fault Summary (Pre-Fault)		
Phase	Voltage	Voltage
	kV	Deg
A	7.9674	30
B	7.9674	-90
C	7.9674	150

Fault Fault Type	Summary (During Fault)				
	Phase	Voltage kV	Voltage Deg	Current Ka	Current Deg
LLL	A	0	-100.23	10.55	-55.08
	B	0	-100.23	10.55	-175.08
	C	0	-59.97	10.55	64.92
LL-BC	A	7.9	29.96	0	0
	B	3.95	-150.04	9.22	-145.03
	C	3.95	-150.04	9.22	34.97
LLG-BC	A	7.17	31.49	0	0
	B	0	0	10.9	179.96
	C	0	0	11.33	68.45
LG-A	A	0	0	11.55	-56.1
	B	7.76	-85.24	0	0

C	7.46	146.26	0	0
---	------	--------	---	---

Thevenin Impedances at Faulted Bus

	R + jX Ohms	R + jX pu	X/R	(2X1+X0)/(2R1+R0)
Z1	0.0648 + j0.7525	0.0340 + j0.3951	11.608	14.778
Z0	0.0109 + j0.5728	0.0057 + j0.3008	52.318	