



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 EL
ALIMENTADOR 2 DE LA POBLACIÓN SAN CRISTÓBAL”

INFORME DE MATERIA INTEGRADORA

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN
POTENCIA**

JAIME JOSUÉ MONTENEGRO NÚÑEZ

CÉSAR MANUEL YALLICO YUMBAY

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2017

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a toda mi familia y en especial a mis padres por la confianza y la perseverancia que me brindaron, que sin lugar a duda me han demostrado su apoyo en todos los proyectos que me he planteado en el trayecto de mi vida.

Jaime Josué Montenegro Núñez

Agradezco a mis padres y hermanos por todo su apoyo en el transcurso de mi vida universitaria.

César Manuel Yallico Yumbay

DEDICATORIA

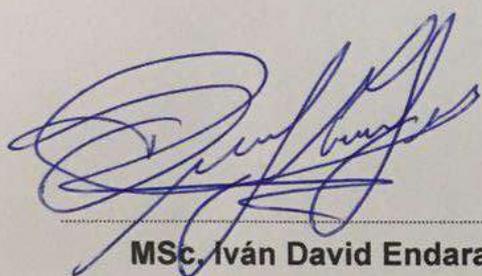
El presente proyecto lo dedico a toda mi familia en especial a mis padres y a mis hermanas por todo el apoyo brindado durante mi vida, a todos los amigos que hice mientras estudié en ESPOL y a mis profesores que nunca se negaron a aclarar las dudas que tuve durante la realización de este proyecto.

Jaime Josué Montenegro Núñez

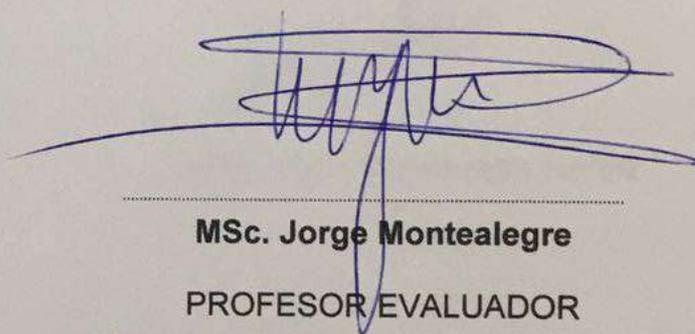
Dedicado a mis padres César y Marcela.

César Manuel Yallico Yumbay

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN



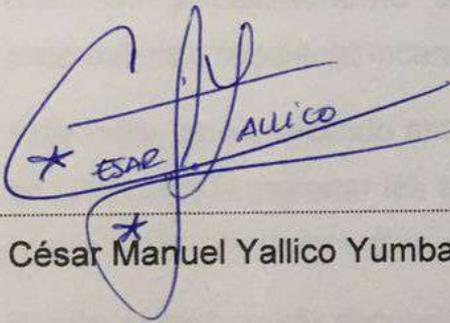
MSc. Iván David Endara
PROFESOR EVALUADOR



MSc. Jorge Montealegre
PROFESOR EVALUADOR

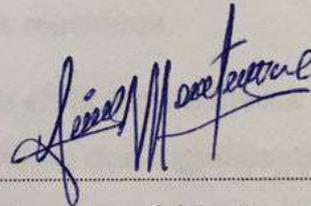
DECLARACIÓN EXPRESA

"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"



* ESPOL Yallico

César Manuel Yallico Yumbay



Jaime Josué Montenegro Núñez

RESUMEN

Debido al cambio de matriz energética promovido por el Gobierno Nacional del Ecuador, preocupado por la viabilidad ecológica, económica y social en las Islas Galápagos, se han implementado medidas para impedir la degradación del hábitat y el impacto ecológico en el vulnerable equilibrio de las especies que conviven en el Parque Nacional Galápagos. Además se incluye la iniciativa “Cero Combustibles Fósiles” que promueve el uso de energías alternativas y fuentes renovables para así disminuir paulatinamente el consumo de combustibles fósiles en Galápagos, promoviendo mediante incentivos el uso de vehículos eléctricos.

Ante esto, se ha decidido analizar el impacto eléctrico en la red de media tensión que se producirá al ingresar los autos eléctricos al sistema, lo que significa que se podrá prever cómo se comportará el sistema eléctrico.

El alto contenido de distorsión armónica originado por los vehículos eléctricos tiene repercusiones notorias en los conductores y transformadores de la red. Adicional a esto, varios de los transformadores se sobrecargaron por la demanda adicional que suponen los vehículos eléctricos.

Tras estas repercusiones tanto armónicas como de sobrecargas, se tomaron medidas que permiten corregirlas; para las distorsiones armónicas se utilizaron 13 filtros sintonizados de armónicos monofásicos, los cuales se conectaron en el lado de baja tensión en varios de los transformadores. Esto permitió que el sistema mantenga los márgenes permitidos de armónicos en la red y con esto, una calidad de energía óptima.

Para las sobrecargas de los transformadores, se cambiaron aquellos que presentaban sobrecargas por unos de mayor capacidad, dando solución a este inconveniente.

Una vez realizadas estas medidas, el sistema opera de manera estable dentro de los rangos permitidos por norma.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN.....	iv
DECLARACIÓN EXPRESA.....	v
RESUMEN	vi
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Actualidad de los vehículos eléctricos.....	2
1.1.1 Configuración de los vehículos eléctricos	2
1.1.2 Funcionamiento del vehículo eléctrico	2
1.1.3 Sistema de almacenamiento de energía.....	3
1.1.4 Baterías	4
1.1.5 Infraestructura de recarga	4
1.2 Vehículos eléctricos en el mercado ecuatoriano	4
1.2.1 Vehículos eléctricos en la provincia de Galápagos	4
1.3 Generación Eléctrica en Galápagos.....	5
1.4 Justificación	5
1.5 Alcance.....	6
1.6 Objetivos.....	6
1.6.1 Objetivos Generales	6
1.6.2 Objetivos Específicos	6
1.7 Marco Teórico.....	6
1.7.1 Simulink	7
1.7.2 Paquete de baterías de iones de litio con falla.....	7
1.7.3 Modelo de batería simplificada	8
1.7.4 Modelo del convertidor	9

1.7.5	Normas que rigen el sistema de conexión del vehículo eléctrico a la red en E.E.U.U	9
1.7.6	Red de distribución de la isla San Cristóbal.....	10
CAPÍTULO 2	12
2.	ESTUDIO DE LA RED DE MEDIA TENSIÓN SAN CRISTÓBAL.....	12
2.1	Desarrollo de los modelos de la batería	12
2.1.1	Circuito eléctrico de la celda de ión de litio.....	12
2.1.2	Modelos de Simscape para elaboración de la celda de ión de litio	13
2.1.3	Construcción de paquete de batería de Nissan Leaf	14
2.1.4	Batería de Simulink	15
2.2	Convertidor AC/DC	16
2.3	Armónicos debido al vehículo eléctrico.	17
2.4	Comportamiento actual del sistema.	19
2.4.1	Curvas de cargas por usuario.....	19
2.4.2	Curvas de carga por transformador.	20
2.5	Comportamiento de los vehículos eléctricos.	21
2.6	Levantamiento de la red de media tensión.....	23
2.6.1	Alimentador 2 en CYMDIST previo al ingreso de vehículos eléctricos.....	23
2.6.2	Alimentador 2 en CYMDIST con ingreso de vehículos eléctricos.....	24
CAPÍTULO 3	26
3.	RESULTADOS.....	26
3.1	Escenario 1.....	32
3.2	Escenario 2.....	35
3.3	Análisis de generación.	39
3.4	Análisis dinámico a largo plazo.	41
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	43
BIBLIOGRAFÍA.....	45

ANEXOS46

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN.

Hace algunos años el actual Gobierno Nacional pensando en el ámbito ecológico, social y económico en las Islas Galápagos ha expresado su intención de actuar para conservar el hábitat y evitar en lo posible el impacto ambiental. Como pieza importante de este compromiso se ha fomentado la iniciativa “Cero Combustibles Fósiles”, con la finalidad de evitar el uso de combustibles derivados del petróleo en las islas promoviendo el uso de energías alternativas de fuentes renovables. [1]

Acorde con esto, la ordenanza que contiene el reglamento de ingreso y control de vehículos y maquinaria a la provincia de Galápagos fija estrategias e incentivos para el ingreso de vehículos eléctricos debido a que tienen la ventaja de no afectar al medio ambiente además de evitar la contaminación acústica. Debido a que hay mayores incentivos hacia el ingreso de vehículos eléctricos ya hay marcas interesadas en incluir sus modelos al mercado ecuatoriano y se espera que en un futuro cercano abarquen la totalidad de vehículos en el archipiélago.

Se considera un vehículo eléctrico a aquel que es propulsado únicamente por uno o más motores eléctricos, que utilizan la energía química almacenada en sus baterías recargables, las cuales se pueden conectar a la red para recargarse mientras se encuentra estacionado. En estos vehículos se transforma la energía eléctrica en energía mecánica por medio de interacciones electromagnéticas. Estos motores eléctricos ofrecen muchas ventajas frente a los de combustión, por su menor tamaño y peso así como su sencillez técnica. [2]

El vehículo eléctrico, así como tiene la ventaja de proteger al medio ambiente, también tiene la necesidad de conectarse a la red para cargar su batería, lo que va a cambiar el comportamiento de la red eléctrica. Con esto se entiende que el ingreso de estos autos vaya a la par con una reestructuración en los hogares, en los edificios de grandes empresas y la implementación de las denominadas electrolineras ya en funcionamiento en Estados Unidos y parte de Europa.

En Galápagos ya se ha trabajado en proyectos para el cambio de generación de energía impulsada por combustibles fósiles a fuentes de energías renovables para

evitar en lo posible derrames de combustible durante el transporte de este, como ya ocurrió con el buque tanque Jessica en el año 2001. El actual gobierno se puso como meta que Galápagos no dependiera de combustibles fósiles desde que se lanzaron los proyectos de generación eólica por lo tanto, la implementación de estos vehículos en Galápagos reduciría la necesidad de transportar combustible al archipiélago.

El sistema en el que se basa el análisis para observar el comportamiento de la red es el de la isla San Cristóbal del archipiélago de Galápagos. La red de distribución de Galápagos ha tenido un crecimiento significativo en los últimos años sin embargo, las redes antiguas no se han repotenciado. Por tanto el ingreso de vehículos eléctricos tendrá repercusiones en el sistema. [3]

Estos autos eléctricos se perfilan para ser el medio de transporte del futuro en el país, por lo que analizar el comportamiento de la red cuando estos lleguen a formar parte de la demanda de energía eléctrica es de suma importancia, ya que representarían un incremento importante en la demanda de energía y por supuesto, se verá afectado todo el sistema eléctrico de la isla.

1.1 Actualidad de los vehículos eléctricos.

1.1.1 Configuración de los vehículos eléctricos

El vehículo eléctrico está constituido por baterías, un motor eléctrico, una transmisión mecánica y un sistema de control.

El objeto de estudio en el proyecto serán las baterías de estos vehículos que se recargan de la red eléctrica.

1.1.2 Funcionamiento del vehículo eléctrico

Estos vehículos cuentan principalmente con un motor eléctrico acoplado al eje de transmisión como se muestra en la Figura 1.1, o a su vez con motores independientes a cada una de las ruedas para dar el movimiento o bien para convertir la energía cinética de las ruedas en electricidad y así cargar las baterías a través del frenado regenerativo.

Los sistemas de tracción eléctricos de los vehículos cuentan con un controlador que recoge la energía de la batería y se lo proporciona al

motor eléctrico. El controlador está asociado al acelerador del vehículo para que este proporcione la energía necesaria para generar la velocidad del vehículo. La implementación del vehículo eléctrico está especialmente dirigida a entornos urbanos en los que el vehículo se encuentra continuamente acelerando y desacelerando lo cual hace que opere el freno regenerativo. [2]

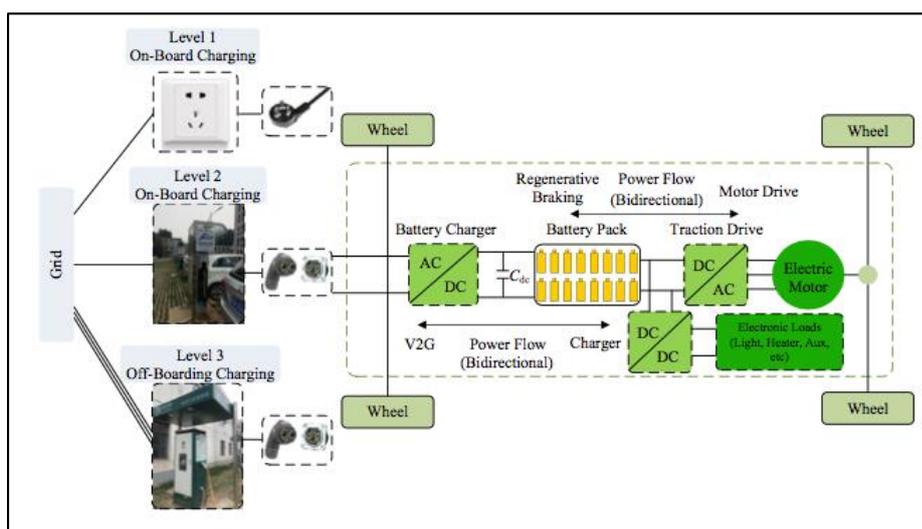


Figura 1.1: Esquema general del vehículo eléctrico. [4]

1.1.3 Sistema de almacenamiento de energía

Los sistemas de almacenamiento pueden acumular energía de diversas formas, ya sea electroquímica, cinética, presión, potencial, electromagnética, química y térmica. Los principales criterios de un sistema de almacenamiento de energía requerida para una aplicación específica son:

- Potencia específica.
- Capacidad de almacenamiento.
- Energía específica.
- Tiempo de respuesta.
- Eficiencia.
- Velocidad de descarga automática/ ciclos de carga.

- Sensibilidad al calor.
- Tiempo de vida de la tasa de descarga de carga.
- Efectos ambientales.
- Costo de capital / operación y mantenimiento.

La mayor parte de las ventajas y limitaciones técnicas, ya sean de baterías o pilas de combustible, radica en el uso mecánico y electroquímico para las que se emplean. [5]

1.1.4 Baterías

La batería es una célula electroquímica que tiene como función transformar la energía química en energía eléctrica. Esta consta de un ánodo y un cátodo separados por un electrolito, que es un conductor iónico y un medio aislante. La generación de electrones se produce en el ánodo los cuales fluyen al cátodo a través del circuito externo; Los tipos de baterías más usadas para los vehículos eléctricos son las baterías de níquel metal-hidruro (NiMH) y las de Iones de Litio (Li-ion). [5]

1.1.5 Infraestructura de recarga

Los vehículos eléctricos requieren de una infraestructura que les permita acceder a una fuente de energía eléctrica que alimente su motor. “Uno de los primordiales desafíos del vehículo eléctrico es crear infraestructuras de recarga fiable, accesible y rápida para los usuarios” [2].

1.2 Vehículos eléctricos en el mercado ecuatoriano

De momento, en nuestro país existen escasos vehículos eléctricos en circulación. El Ministerio Coordinador de Producción, Empleo y Competitividad (MCPEC) firmó un convenio denominado: “Convenio marco para la promoción, comercialización y perspectivas de fabricación de baterías y vehículos eléctricos en la República del Ecuador” con grandes marcas fabricantes de vehículos eléctricos como son: Nissan, Renault, KIA, y BYD. Dicho convenio tiene como objetivo que estas marcas introduzcan sus vehículos eléctricos al mercado local. [2]

1.2.1 Vehículos eléctricos en la provincia de Galápagos

El proyecto piloto promovido por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER), denominado 'Cero Combustibles Fósiles' aplicado a la provincia de Galápagos en las Islas Santa Cruz, San Cristóbal e Isabela, tiene la intención de reducir la contaminación ambiental y el transporte de los derivados del petróleo. Este proyecto tiene como misión la implementación de los vehículos eléctricos: Nissan Leaf y Renault Kangoo Ze; para estimular a la conservación del medio ambiente y erradicar la dependencia de los derivados del petróleo. [2]

Para esto se debe tomar en consideración cuántos vehículos existen en la isla; según el censo vehicular realizado por el INGALA en el 2009, existen 1962 vehículos en todo Galápagos [8]

1.3 Generación Eléctrica en Galápagos

Existen proyectos enmarcados en la iniciativa "Cero Combustibles Fósiles" para Galápagos como la producción de aceite de piñón para la generación eléctrica; Este tiene como objetivo sustituir el diésel usado para la generación eléctrica por aceite vegetal a través del desarrollo agroindustrial del piñón existente en La Cerca Viva de la provincia de Manabí. [6]

Existen varios proyectos eólicos en diferentes puntos de la provincia, así como también sistemas híbridos fotovoltaico-diésel los cuales consisten en una central fotovoltaica que trabaja en conjunto con una central diésel que opera en forma complementaria para suplir el déficit de la demanda de punta de energía y/o en casos que las condiciones meteorológicas lo exijan.[7]

1.4 Justificación

Este proyecto se realiza debido a que el cambio de la matriz energética promueve el uso de energías renovables para paulatinamente erradicar el uso de combustibles fósiles en el archipiélago de Galápagos.

Además del control de ingreso de vehículos convencionales, existen incentivos para el uso de vehículos eléctricos en la provincia debido a sus ventajas ambientales por lo que se espera un notable crecimiento en el ingreso y uso de vehículos eléctricos en los próximos años.

Ante esto, la recarga masiva de las baterías de los vehículos eléctricos tendrán notorios impactos en la red, ya sea debido a las distorsiones armónicas producidas por estos o a su vez por las nuevas cargas que se deben suplir ante su ingreso.

1.5 Alcance

Se espera realizar una simulación de la red de media tensión de la zona centro sur de la isla San Cristóbal integrando diferentes modelos de vehículos eléctricos para observar el comportamiento de este sistema.

También se espera proponer las mejoras necesarias en la red de media tensión en la zona centro sur de la isla San Cristóbal en base a la observación del comportamiento de esta red ante el ingreso de vehículos eléctricos para que tenga un funcionamiento aceptable en cuanto a calidad y continuidad del servicio.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivos Generales

Este trabajo tiene como objetivo analizar el comportamiento de una red de distribución en Galápagos ante el ingreso de vehículos eléctricos; los cuales nos permitan proveer un mejor panorama ante este escenario, y así se puedan realizar acciones correctivas de ser necesarias.

1.6.2 Objetivos Específicos

Simular el comportamiento del proceso de carga y descarga de un vehículo eléctrico en base al uso de modelos matemáticos.

Conocer la afectación en la red al existir el ingreso de los vehículos eléctricos.

Proponer, en caso de ser necesario, los posibles cambios (en la red y en la generación) que se tengan que realizar para que el sistema funcione correctamente ante el aumento de la demanda de energía que se producirá por el incremento de la carga.

1.7 Marco Teórico

1.7.1 Simulink

Simulink es una librería de Matlab con herramientas que se utilizan para aplicaciones de control avanzado. Entre estas está SimPowerSystems que permite realizar modelos que simulan sistemas eléctricos, como lo son circuitos eléctricos, elementos electromecánicos (máquinas rotativas), baterías, convertidores, rectificadores, etc. Es decir, en esta librería se tiene todos los elementos necesarios para realizar una simulación muy real de lo que pasa internamente en un vehículo eléctrico.

En esta librería se puede encontrar ejemplos de cómo simular un conjunto de baterías de ion de litio con varias celdas, por lo que Simulink sirve para modelar la batería del auto eléctrico según las características de las diferentes marcas de autos que vamos a usar. [8]

1.7.2 Paquete de baterías de iones de litio con falla

Este ejemplo muestra el modelo de un conjunto de baterías con múltiples celdas conectadas como se aprecia en la Figura 1.2, además de poder introducir una falla en cualquiera de las celdas lo que va a representar un cambio en el rendimiento y la temperatura. Para simular el modelo de batería de vehículo se puede partir de este ejemplo para ajustarlo a uno que contenga 4 celdas por paquete de baterías.

De este modelo se va a obtener las características de carga y descarga de la batería del vehículo que son las que más interesan además del estado de carga y temperatura. Para esto se necesita obtener varios parámetros como voltaje, capacidad, estados de carga inicial, además de la temperatura ambiente de la zona. [8]

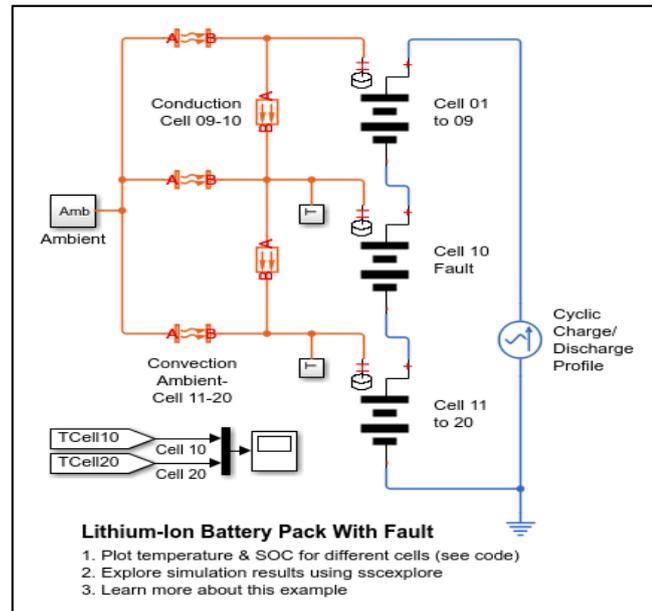


Figura 1.2: Ejemplo de paquete de baterías de iones de litio. [8]

1.7.3 Modelo de batería simplificada

Este bloque de batería implementa un modelo dinámico genérico parametrizado para representar los tipos más populares de baterías recargables.

Este modelo requiere una serie de parámetros que se pueden modificar para representar un tipo particular de batería, basado en su característica de descarga mostrada en la Figura 1.3. Una curva de descarga típica se compone de tres secciones: curva de descarga, área nominal y área exponencial.

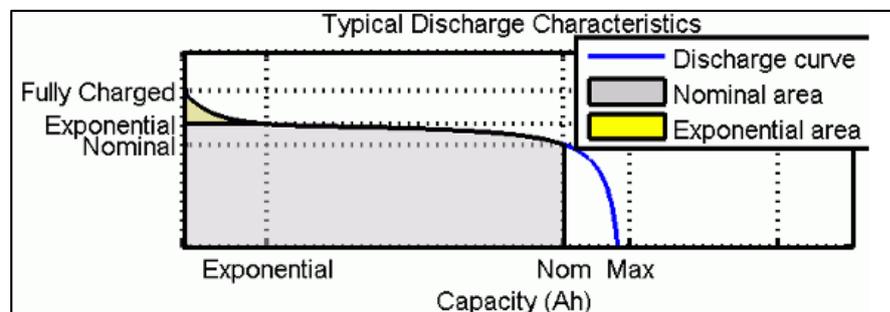


Figura 1.3: Característica de descarga típica.

1.7.4 Modelo del convertidor

El cargado del vehículo eléctrico consiste en un convertidor de corriente AC/DC y algunos componentes que sirven de filtrado. Una solución eficiente para hacer un sistema de alta densidad de potencia, es la integración de la unidad del cargador con el convertidor de la unidad del motor. Es viable compartir los mismos dispositivos de conmutación de potencia y componentes pasivos ya que el accionamiento del motor y el modo de carga de la batería no ocurren al mismo tiempo. Esta configuración reduce significativamente el tamaño y los costos del sistema general. [4]

1.7.5 Normas que rigen el sistema de conexión del vehículo eléctrico a la red en E.E.U.U.

El éxito de los vehículos eléctricos depende de los lugares que estén disponibles para la recarga de sus baterías

Lo importante de esto es llevar a cabo de manera eficiente la instalación de estos puntos de carga y la conexión de los vehículos, los cuales ya se rigen bajo ciertas normas mostradas en el esquema de la Figura 1.4 además de la descripción de cada estándar en la Tabla 1.

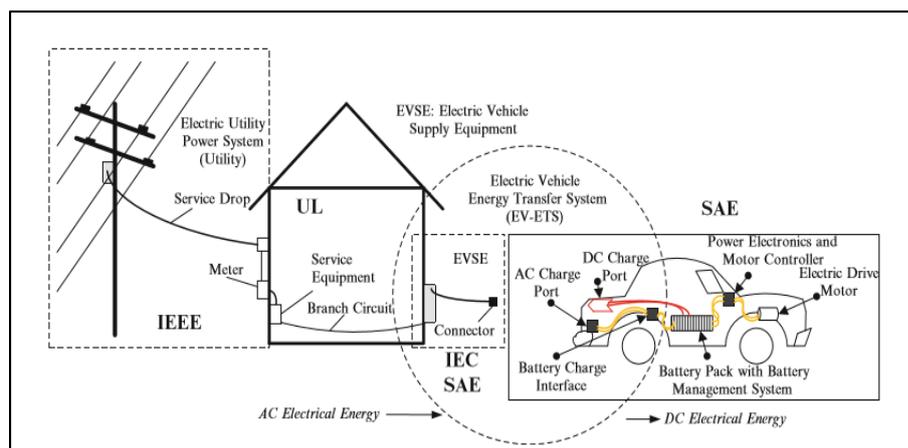


Figura 1.4: Esquema de conexión del vehículo con su respectivo estándar [9].

ESTÁNDAR	TÍTULO/DESCRIPCIÓN
National Electric Code Article 625	Electric Vehicle Charging System
SAE J2293	Energy Transfer System for Electric Vehicles
SAE J2836	Recommended Practice for Comunication between Plug-in Vehicles and Utility Grid
SAE J1772	Electric Vehicle Conductive Charge Coupler
SAE J1773	Electric Vehicle Inductively Coupled Charging
IEC 62196	Plugs, socket outlets, vehicle couplers and vehicle inlets- Conductive charging of electric vehicles
IEEE 1547.3	Interconnecting distributed Resources with Electric Power Systems

Tabla 1: Estándares usados en E.E.U.U. relacionados a la carga de vehículos eléctricos. [9]

1.7.6 Red de distribución de la isla San Cristóbal

Para analizar la red se realizará el levantamiento del sistema actual de distribución de la isla San Cristóbal, por lo que es necesario seguir un orden. Ya que en los últimos años se han llevado a cabo trabajos de refuerzo de las redes en varios sectores de la isla, no serviría un levantamiento que no está actualizado. Hacer el levantamiento de un sistema de distribución brinda suficiente información para desarrollar simulaciones que permitan estudiar el comportamiento de la red. La información sobre una red de distribución es levantada de acuerdo al siguiente proceso:

- Se debe de tener a disposición principalmente los planos y las normas de diseño.
- Observar las características del terreno, las vías y sitios importantes en el sitio (Subestación, alimentador principal, derivaciones significantes).
- Para tener facilidad al transcribir los datos a la computadora usar datos ordenados en tablas.

Además de realizar el levantamiento se cuenta con información valiosa como: el esquema de la red, la comparación de modelos de demanda y demanda de los últimos años.

CAPÍTULO 2

2. ESTUDIO DE LA RED DE MEDIA TENSIÓN SAN CRISTÓBAL.

Para realizar el análisis de una red de media tensión, se necesita elaborar la simulación de la batería y convertidores del vehículo eléctrico además de la red. Con esto se podrá observar las características del sistema.

Las simulaciones del vehículo eléctrico y del Alimentador 2 de San Cristóbal se realizaron en Simulink y en Cymdist respectivamente.

2.1 Desarrollo de los modelos de la batería

Para elaborar los modelos de batería del vehículo eléctrico, se parte del ejemplo 'Lithium-Ion Battery Pack With Fault' proporcionado por Matlab y mostrado en la Figura 1.2 ya que la celda de ión de litio usada en este ejemplo es similar a las usadas para formar la batería del auto. A continuación se muestra el proceso de modelado partiendo del circuito eléctrico de la celda.

2.1.1 Circuito eléctrico de la celda de ión de litio

La celda es la unidad más básica de la batería del auto eléctrico. Se puede realizar un modelado de la celda utilizando elementos eléctricos como se muestra en la Figura 2.1.

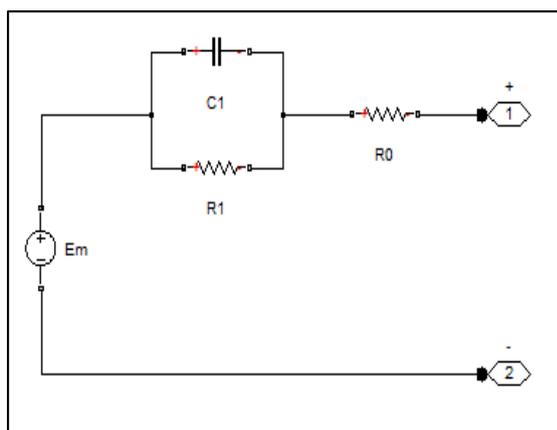


Figura 2.1: Modelo eléctrico de la celda de ión de litio.

Los elementos de este circuito representan la resistencia interna de la batería, resistencia entre los electrodos y también la capacidad en los electrodos.

La capacidad de la celda de ión de litio depende de varios parámetros, principalmente de la temperatura y del estado de carga, por esta razón un modelo eléctrico no sería una representación real de lo que sucede dentro de una celda. Ya que no es suficiente este modelo se usarán modelos de Simscape previamente elaborados y disponibles en las librerías de Matlab.

2.1.2 Modelos de Simscape para elaboración de la celda de ión de litio

En las versiones más recientes de Matlab (R2015a en adelante) se encuentran las librerías adecuadas, mostradas en la Figura 2.2, para la elaboración del modelo de la celda de litio. Ya que se usará Matlab R2012a, se deben instalar las librerías para que el modelo de celda funcione en esta versión del software.

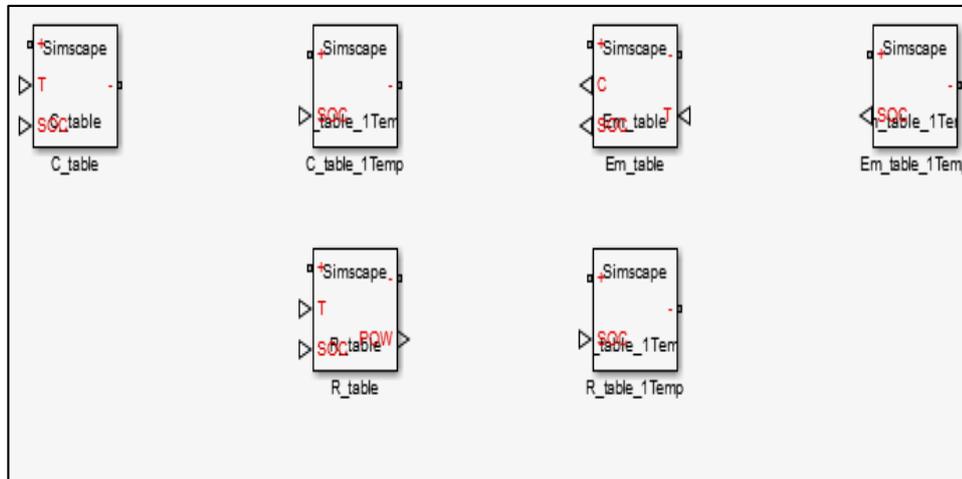


Figura 2.2: Modelos de Simscape usados en la elaboración de la celda.

La celda de Matlab utiliza los modelos Em_table, R_table y C_table que simulan los elementos del circuito eléctrico. El circuito se muestra en la Figura 2.3.

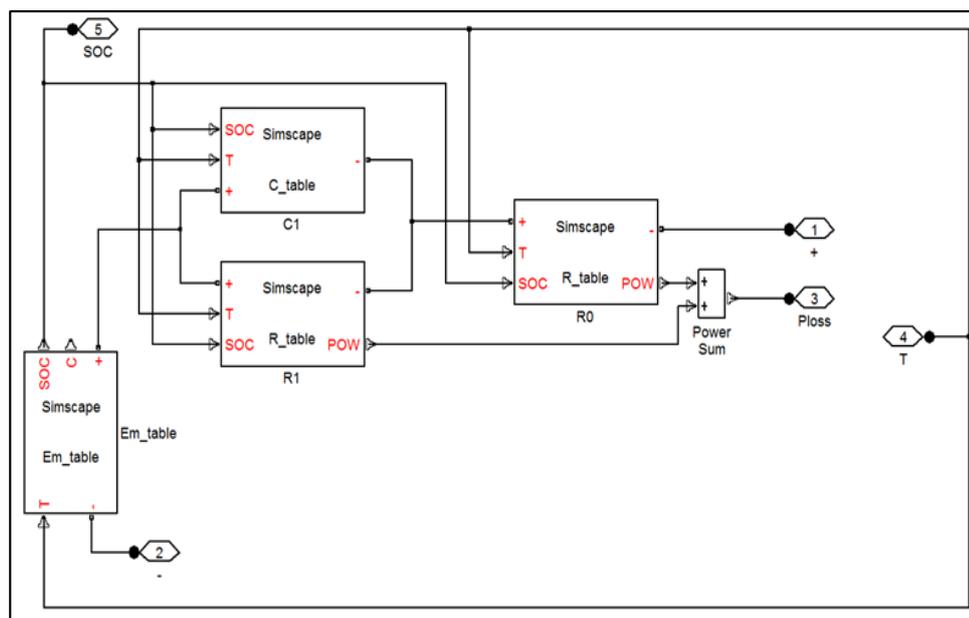


Figura 2.3: Modelo real de la celda de ión de litio.

Es el mismo circuito mostrado en la Figura 2.1 con la diferencia de que es un modelo más real puesto que depende de otros parámetros como la temperatura ambiente y la temperatura de las resistencias que van a estar dadas por la potencia disipada en estas. Además, este modelo muestra el estado de carga dependiente de los elementos entre sí.

2.1.3 Construcción de paquete de batería de Nissan Leaf

El Nissan Leaf es uno de los vehículos eléctricos que ya se están comercializando en el mundo. Su batería está compuesta de 192 celdas repartidas en 48 módulos de 4 celdas cada uno, con dos filas de celdas conectadas en serie y a su vez conectadas en paralelo [11]. El modelo de la batería de este vehículo está representado en la Figura 2.4 (Ver modelo completo en Anexo A).

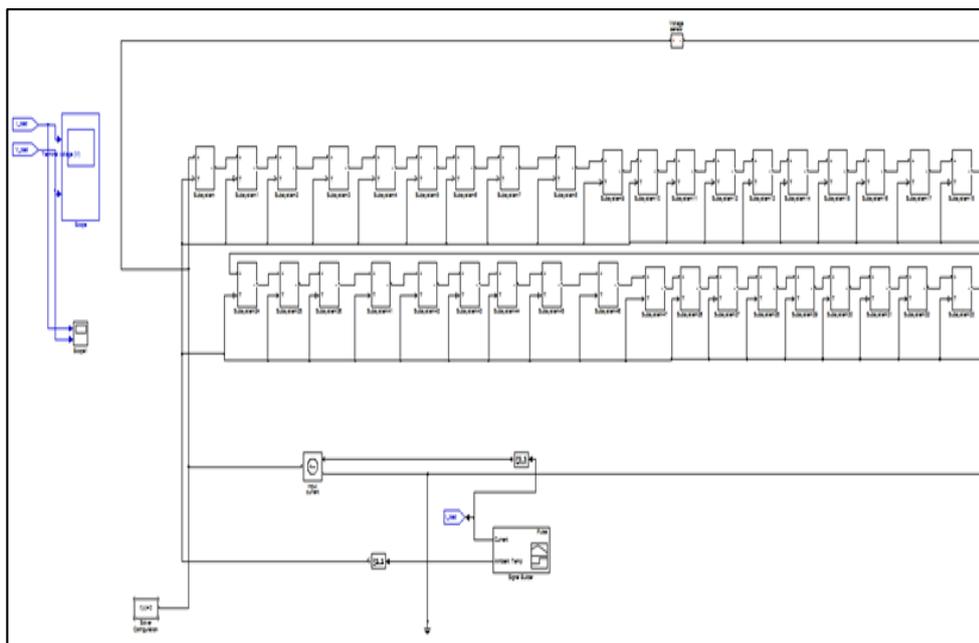


Figura 2.4: Modelo de batería de Nissan Leaf.

Este modelo es alimentado por una señal de corriente cuadrada de un bloque generador de funciones por lo que no serviría para realizar análisis de armónicos. Por esta razón, para alimentarlo desde la simulación de la red también se elaborará un convertidor AC/DC.

Debido al extenso tiempo de simulación que requiere el modelo de batería de Nissan Leaf, se ha planteado usar el bloque “Battery” de Simulink que se carga con una mayor rapidez.

2.1.4 Batería de Simulink

Con el bloque “Battery” de Simulink se logra llevar a cabo la simulación en un tiempo más corto. Este bloque implementa un modelo dinámico genérico parametrizado que actúa como los modelos más usados de baterías como es el caso de la batería de iones de litio.

Los parámetros se obtienen de los datos del paquete de batería y de la característica de descarga (ver Anexo B). Ajustando los parámetros que solicita el modelo como se muestra en la Tabla 2, se obtendrá un modelo de batería confiable. Su esquema se muestra en la Figura 2.5.

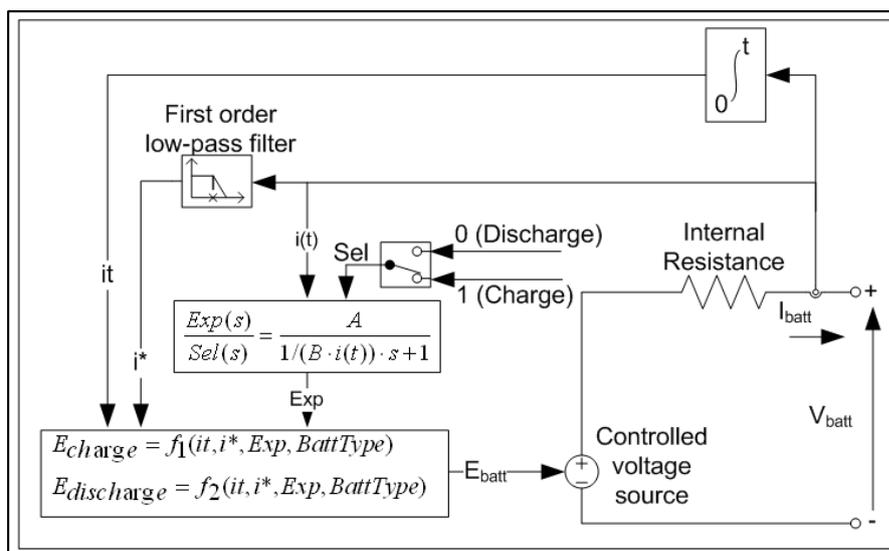


Figura 2.5: Esquema del bloque "Battery" de Simulink.

PARAMETROS	TÍTULO/DESCRIPCIÓN
Voltaje Nominal	96x3.8 V
Capacidad Nominal	33.1x2 Ah
Estado Inicial de Carga	Variable
Capacidad Máxima	69.51 Ah
Voltaje Completamente Cargado	408 V
Corriente Nominal de Descarga	13.24 A
Resistencia Interna	0.055 ohms
Capacidad a Voltaje Nominal	42 Ah
Voltaje de Zona Exponencial	393.6 V
Capacidad de Zona Exponencial	3.2 Ah

Tabla 2: Parámetros del modelo de batería ajustados en el bloque "Battery"

2.2 Convertidor AC/DC

El convertidor AC/DC de la Figura 2.6 está diseñado para obtener una corriente de aproximadamente 10 A en los terminales de la batería a partir de una alimentación de 220 Vrms.

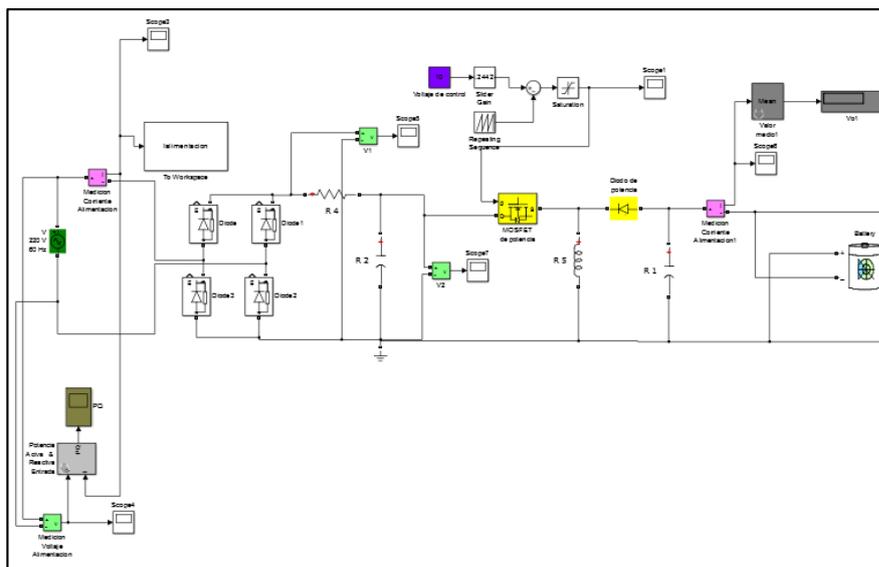


Figura 2.6: Convertidor AC/DC del vehículo eléctrico.

El puente rectificador es no controlado y usa un filtro capacitivo justo a la salida de la señal rectificada. Cuenta con un MOSFET de potencia que produce 5 switcheos por ciclo limitando el voltaje en la salida y por lo tanto, afectando a la corriente de carga.

Con el convertidor, la batería recibe un voltaje de aproximadamente 390 V muy cercano al voltaje de la zona exponencial (Ver Anexo C) con una corriente de 10 A por lo que en la batería se puede observar una rapidez de carga media.

2.3 Armónicos debido al vehículo eléctrico.

Debido al uso de convertidores y demás elementos de electrónica de potencia, los vehículos eléctricos representarán una afectación importante a las redes de distribución, en este caso la de San Cristóbal. En el Capítulo 3 se observará el aumento de distorsión armónica en la tensión y en la corriente.

Se obtuvieron los armónicos de la corriente de alimentación de un ciclo para diferentes estados de carga (Anexo D). La distorsión armónica producida por vehículos eléctricos varía según el estado de carga, pero en esta simulación no es una variación significativa como se puede observar en la Figura 2.7 y la Figura

2.8 que son la distorsión armónica desde un estado inicial de carga del 40% y 70% respectivamente.

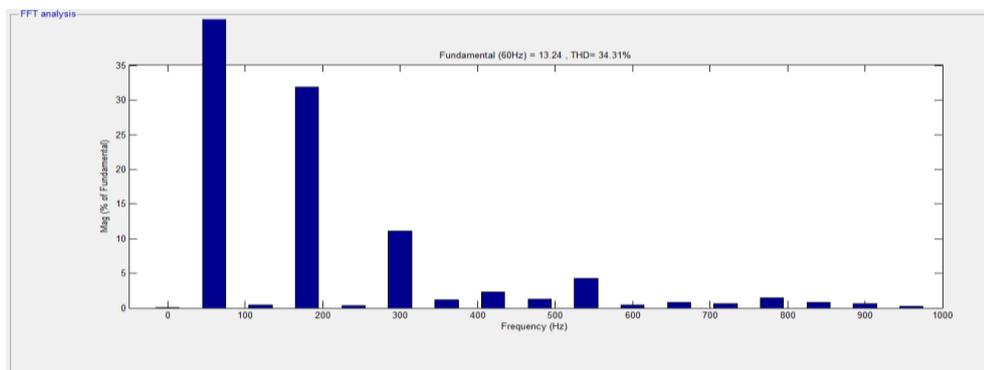


Figura 2.7: Armónicos producidos en la recarga del vehículo eléctrico con estado inicial de carga de 40%.

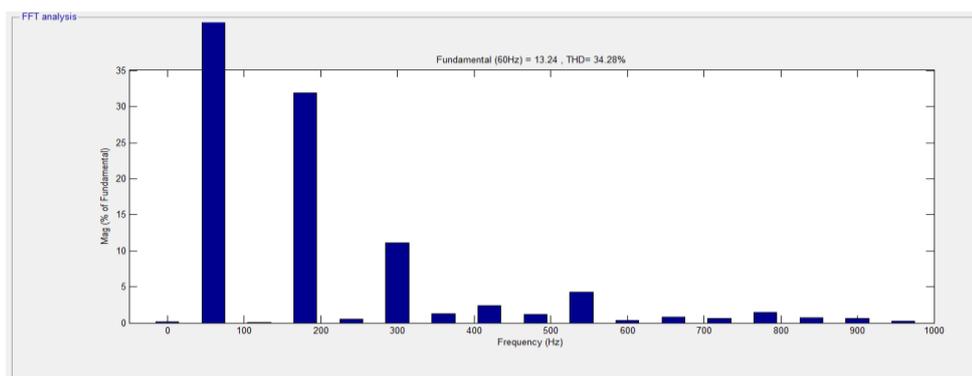


Figura 2.8: Armónicos producidos en la recarga del vehículo eléctrico con estado inicial de carga de 70%.

Estos armónicos van a afectar de manera especial a la amplitud de las señales de voltaje y corriente de la red de distribución. Se tiene una Distorsión Armónica Total (THD) de más de 34% de la frecuencia fundamental de 60 Hz, provocando una alta ineficiencia en el sistema ya que aproximadamente solo el 66% de la potencia entregada a la salida del convertidor va a estar presente en la señal rectificada.

Además cuenta con una componente DC en ambos casos de más de 0.00896 A que debería filtrarse.

2.4 Comportamiento actual del sistema.

2.4.1 Curvas de cargas por usuario.

Se realizó la curva de carga gracias a los datos obtenidos desde Elecgalapagos S.A que se tomaron en períodos de 15 minutos durante un año.

Estos datos fueron usados para formar una curva de carga diaria por usuario asumiendo que todos los usuarios consumen aproximadamente la misma energía debido a que en San Cristóbal la mayoría de abonados son residenciales.

La curva de carga por usuario se formó obteniendo el promedio de los datos de potencia consumida en intervalos de 15 minutos de todos los días del año. Cabe recalcar que las curvas de carga de cada usuario tienen un comportamiento similar pero no el mismo, por lo que para generar las demás curvas de carga se agregó una variación de $\pm 10\%$ de la potencia consumida en cada intervalo de 15 minutos. En la Figura 2.9 se puede observar la curva de carga aproximada por abonado.

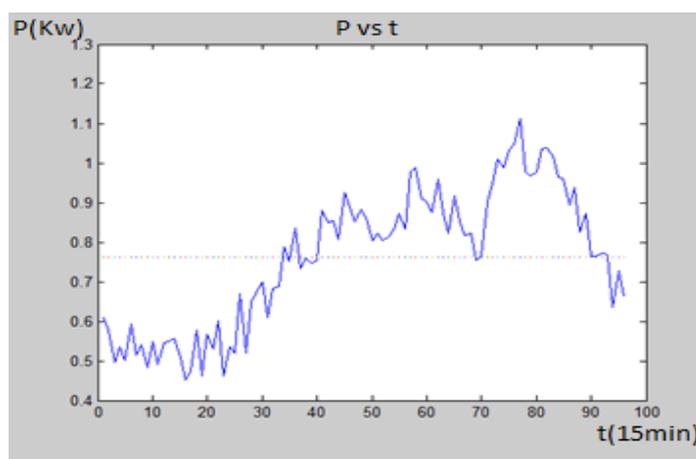


Figura 2.9: Curva de demanda diaria de un usuario promedio.

La curva de carga promedio muestra su pico de 1.1 KW entre las 19:00 y 20:00 mientras que el mínimo consumo que se registra al día es de 0.45 KW registrado entre las 03:00 y 04:00, además de la potencia promedio de 0.77 KW. Es una curva típica de usuarios residenciales.

2.4.2 Curvas de carga por transformador.

En el Alimentador 2 de la isla San Cristóbal existen 48 transformadores en los cuales se encuentran distribuidas 686 acometidas. Para obtener una distribución más confiable, se separó las zonas más pobladas del área del Alimentador 2 de los lugares poco habitados. El sector está dividido como se muestra en la Figura 2.10.

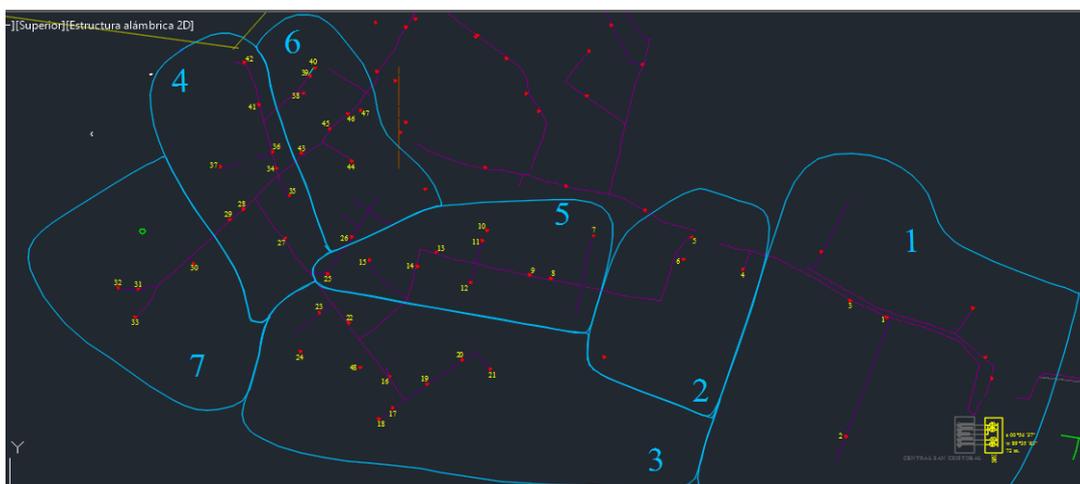


Figura 2.10: Alimentador 2 dividido en zonas.

La curva de carga de los transformadores va a variar según la zona en la que se encuentre por lo que habrá transformadores más cargados en las zonas con mayor población. En la Figura 2.11 se presenta la curva de carga de uno de los transformadores de la zona 5 que cuenta con 29 acometidas.

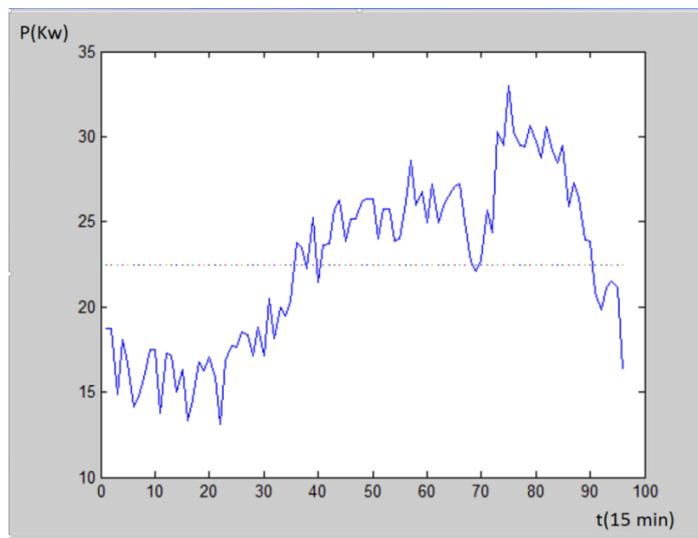


Figura 2.11: Curva de carga del transformador 14 del Alimentador 2 de San Cristóbal.

2.5 Comportamiento de los vehículos eléctricos.

Para estimar cómo actúan los vehículos eléctricos, se asumió que tendrán el mismo uso que tienen actualmente los autos convencionales y se obtuvo su comportamiento a través de encuestas realizadas en una población pequeña (Anexo F).

En la Figura 2.12 se muestra los datos más importantes usados en este estudio.

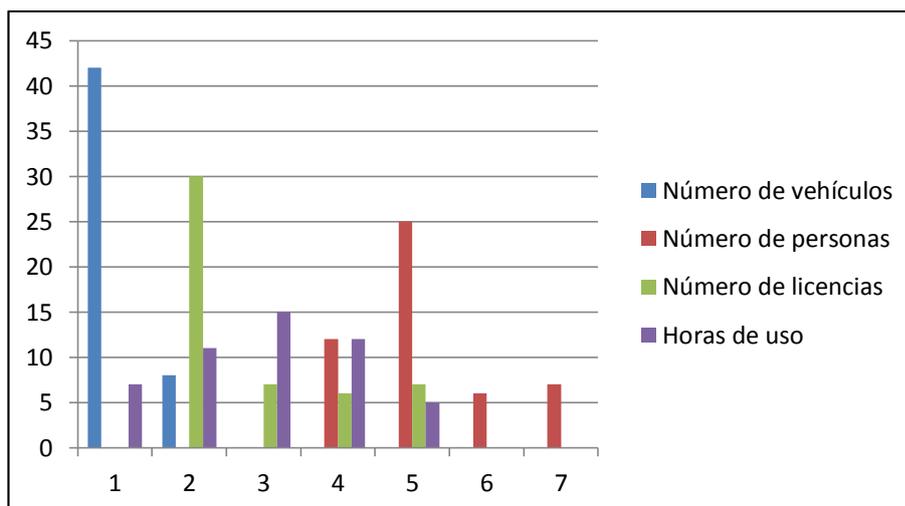


Figura 2.12: Comportamiento de vehículos de una población pequeña.

De esta encuesta se obtuvo que en el 90% de los hogares se usa el vehículo durante un máximo de 4 horas al día, lo que representa que los vehículos eléctricos no se descargarán completamente y no estarán mucho tiempo recargando su batería.

También se obtuvo que en casi el 70% de los hogares no se usa el vehículo en la noche y en la madrugada, por lo que el horario más común de carga del vehículo eléctrico estaría entre las 19:00 y las 6:00 horas.

En el 100% de los hogares hay como mínimo dos personas capaces de conducir un vehículo por esta razón, el vehículo eléctrico se descargará aún más y por ende pasará más tiempo conectado a la red cargando su batería.

Según el resultado del censo de vehículos realizado por el INGALA en el 2009, existen 1962 vehículos registrados en toda la provincia de Galápagos, de los cuales 699 están en la isla San Cristóbal. De este total, 110 son taxis y 438 vehículos corresponden a particulares incluyendo 380 motocicletas.

De los 110 taxis que existen en la isla, 57 pertenecen al Alimentador 2 de la subestación San Cristóbal. Adicional a esto, 70 vehículos particulares también se conectarán a este alimentador.

El comportamiento de las taxis dentro de la isla es muy diferente debido a que aunque no tienen que recorrer largas distancias lo van a hacer con frecuencia. Cada taxi hace un promedio de 15 carreras al día además de estar en constante circulación, lo que significa que van a tener mayores períodos de carga de las baterías de los vehículos eléctricos probablemente en las tardes.

No cabe duda que los taxis tienen una importancia cada vez más notable en la vida de la población, estimando 1 taxi por cada 50 habitantes; aproximadamente cada taxi consume en promedio ocho galones diarios de combustible.

El aumento en la circulación y uso de taxis tiene impactos ambientales notables en la isla. El fuerte consumo de combustible de los taxis, resultado de los 240 [Km] recorridos diariamente en promedio por cada taxi, se traduce también por emisiones de dióxido de carbono. Además, el fuerte consumo de combustible provoca el incremento del número y/o frecuencia de arribo de barcos tanqueros

a Galápagos, lo que agrava el riesgo de derrames de combustible en el mar. Se debe considerar también los daños que difícilmente son evaluables como el incremento del ruido, la degradación de los paisajes insulares así como el creciente estrés de los habitantes por el tráfico automotor. [1]

Los taxis en la isla no son solo un medio de transporte sino también un sector económico en creciente desarrollo donde sumas considerable de dinero están en juego.

2.6 Levantamiento de la red de media tensión

El área de estudio asignada es la zona centro sur mostrada en la Figura 2.13, que se rige por el Alimentador 2, con 48 transformadores de potencia de 37,5 KVA distribuidos en el centro sur de la ciudad con sus respectivas cargas homogéneas.

El levantamiento de la red se realizó con la ayuda del programa de análisis de redes de distribución CYMDIST, el cual permite realizar estudios de planeamiento así como simular el comportamiento de las redes de distribución en distintas condiciones de funcionamiento ante distintos escenarios.

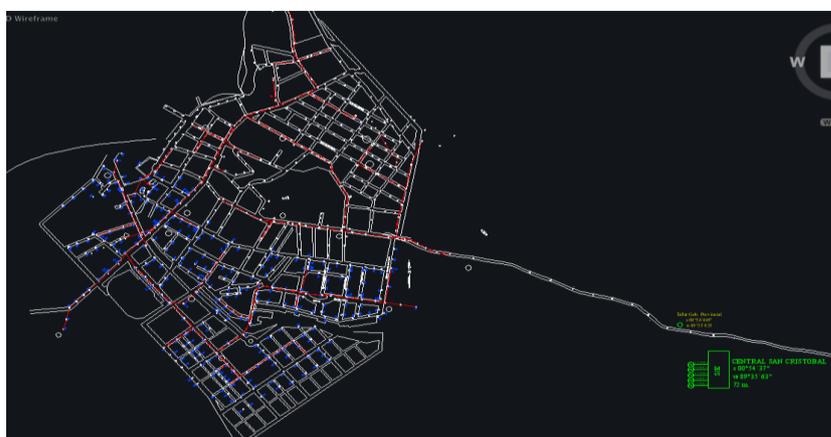


Figura 2.13: Red de media tensión de San Cristóbal.

2.6.1 Alimentador 2 en CYMDIST previo al ingreso de vehículos eléctricos.

En la Figura 2.14 se presenta la red de media tensión correspondiente al Alimentador 2 de la isla San Cristóbal. En ésta, la carga de los vehículos eléctricos se encuentra desconectada tomando en cuenta solo las cargas

residenciales; es por esto que dichas cargas se representan con el color morado el cual indica que están desconectadas.

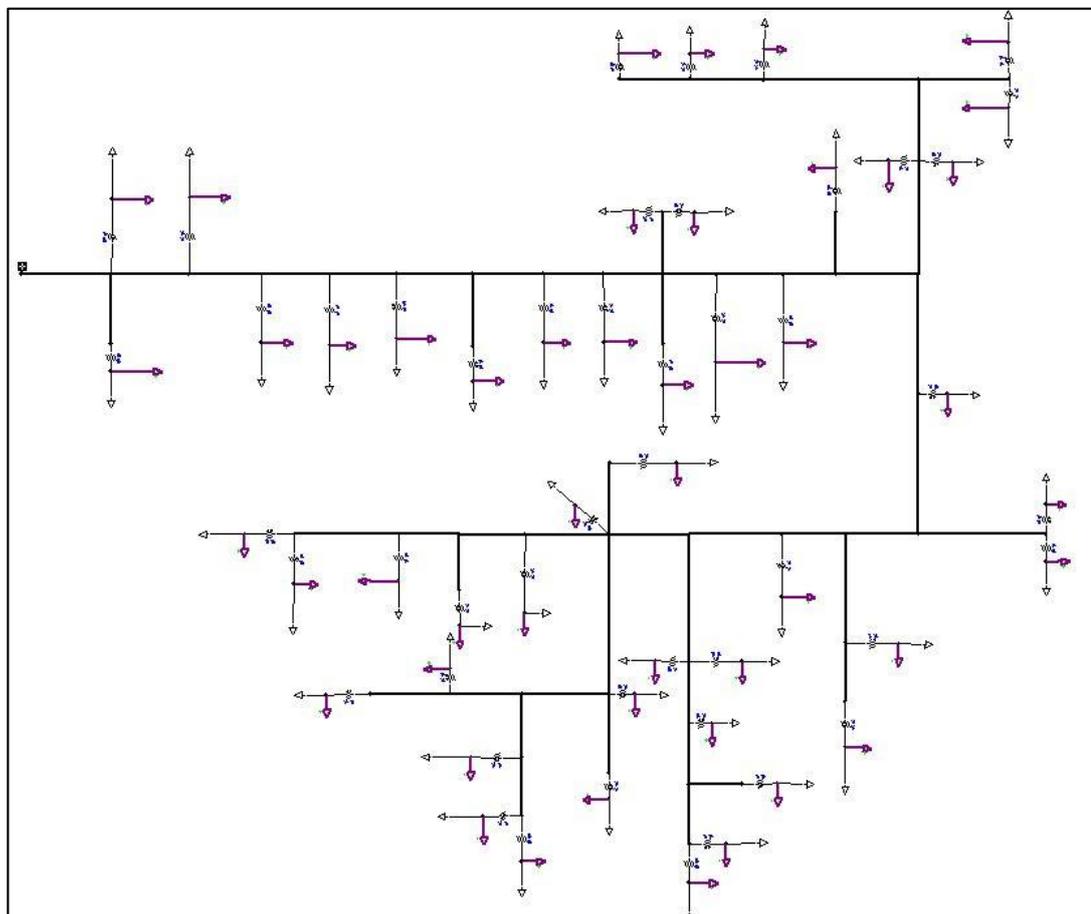


Figura 2.14: Alimentador 2 de San Cristóbal, cargas de vehículos eléctricos desconectadas.

2.6.2 Alimentador 2 en CYMDIST con ingreso de vehículos eléctricos.

En la Figura 2.15 se observa la misma red de la Figura 2.14 con la diferencia de que la carga de los vehículos eléctricos se encuentra conectada. Debido a esta carga adicional el sistema va a presentar la distorsión armónica esperada.

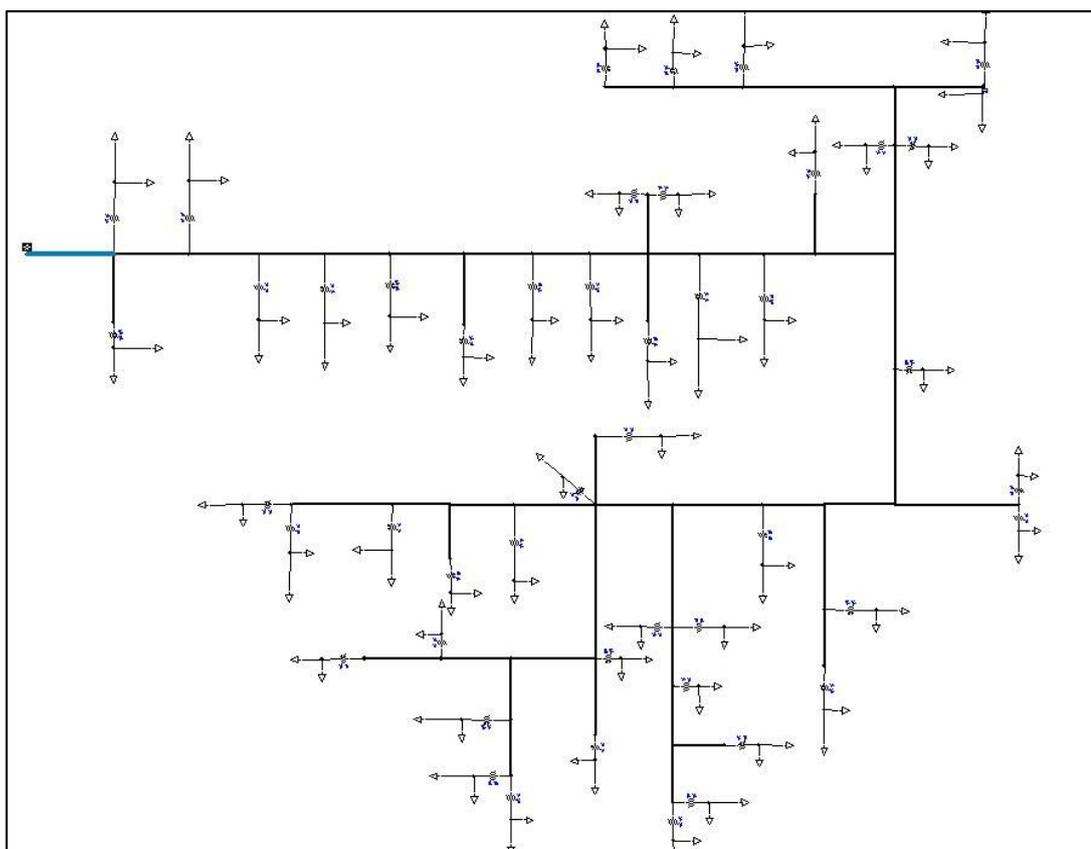


Figura 2.15: Alimentador 2 de San Cristóbal, cargas de vehículos eléctricos conectadas.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS.

En este capítulo se mostrará la operación y comportamiento del sistema ejecutado en el programa de análisis de redes de distribución CYMDIST.

Una vez conectados los vehículos eléctricos, se observa que el sistema presenta problemas de sobrecarga en los transformadores T11, T38 y T43; estas sobrecargas son debido a que estos transformadores se encontraban cargados alrededor del 90% de su capacidad nominal antes del ingreso de los vehículos y una vez agregado la carga de los vehículos eléctricos superaron los límites de carga. A este inconveniente se le suma la elevada distorsión de corriente en las líneas del sistema debido a las armónicos generados por las cargas no lineales de los vehículos eléctricos.

De acuerdo a los resultados que se obtuvieron en el flujo de carga realizado en el programa de análisis de redes de distribución CYMDIST los cuales se presentan en detalle en el Anexo G, se notó que las variaciones de tensión están dentro de los rangos permitidos; es por esto que este análisis se centrará mayormente en las sobrecargas de los transformadores así como también en el análisis armónico en las líneas y transformadores.

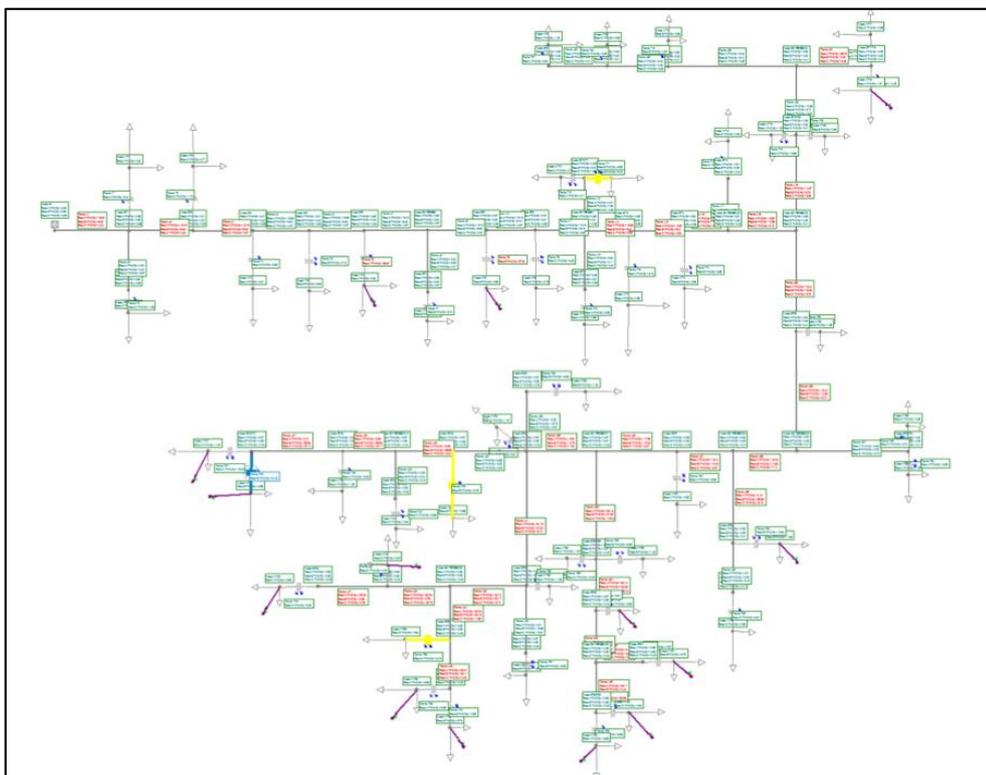


Figura 3.1: Armónicos en la red.

Flujo de carga - Transformadores sobrecargados			
Nro. equipo	Nodo origen	Nodo destino	Carga (%)
T11	BT10T11	NT11	108,4
T43	BT43	NT43	104,4
T38	BT38	NT38	104,3

Tabla 3: Transformadores de 37,5 KVA sobrecargados

En la Tabla 3 se puede observar los porcentajes de sobrecarga de los transformadores que se vieron afectados con el ingreso de vehículos eléctricos a la red; estas sobrecargas en el transformador se ven reflejadas en el calentamiento del mismo, incremento en las pérdidas de energía y en una reducción de su vida útil.

En la Tabla 4 se observa como varias de las líneas y transformadores superan los valores permitidos de Distorsión Total de la Demanda (TDD), así como también se notó que únicamente existen problemas en el tercer Armónico de Corriente (ITHD).

Nro. equipo	Tipo de dispositivo	Corriente fund. (Amp)	180.00 Hz IHD (%)	THD (%)	ITIF	Isc/IL	TDD (%)
L1-A	Línea aérea por fase	038	012	013	021	332	013
L14-A	Línea aérea por fase	028	013	014	024	165	014
L15-A	Línea aérea por fase	024	015	017	028	192	017
L16-A	Línea aérea por fase	024	015	017	028	185	017
L18-A	Línea aérea por fase	024	015	017	028	182	017
L19-A	Línea aérea por fase	005	014	015	025	793	015
L2-A	Línea aérea por fase	035	013	014	023	252	014
L21-A	Línea aérea por fase	001	028	030	050	3.563	030
L25-A	Línea aérea por fase	019	016	017	028	220	017
L25-B	Línea aérea por fase	018	013	014	023	222	014
L26-A	Línea aérea por fase	019	016	017	028	216	017
L26-B	Línea aérea por fase	015	014	015	025	265	015
L28-A	Línea aérea por fase	016	018	019	032	251	019
L28-B	Línea aérea por fase	015	014	015	025	261	015
L29-B	Línea aérea por fase	001	028	030	050	3.492	030
L31-A	Línea aérea por fase	016	018	019	032	246	019
L31-B	Línea aérea por fase	014	013	014	023	277	014
L32-A	Línea aérea por fase	014	017	018	030	270	018
L32-B	Línea aérea por fase	014	013	014	023	269	014
L33-A	Línea aérea por fase	004	029	031	052	1.032	031
L33-B	Línea aérea por fase	003	021	023	038	1.071	023
L34-A	Línea aérea por fase	004	029	031	052	1.003	031
L34-B	Línea aérea por fase	002	029	031	052	2.000	031
L34-C	Línea aérea por fase	000	022	024	041	7.697	024
L35-A	Línea aérea por fase	002	029	031	052	1.950	031
L35-B	Línea aérea por fase	002	029	031	051	1.940	031
L35-C	Línea aérea por fase	000	022	024	041	7.459	024
L36-A	Línea aérea por fase	002	029	031	052	1.891	031
L36-C	Línea aérea por fase	000	022	024	040	7.215	024
L37-B	Línea aérea por fase	002	029	031	051	1.882	031
L38-A	Línea aérea por fase	011	012	013	022	344	013
L4-A	Línea aérea por fase	035	013	014	023	232	014
L41-A	Línea aérea por fase	006	020	022	037	590	022
L41-B	Línea aérea por fase	003	021	023	038	1.042	023
L43-A	Línea aérea por fase	004	023	025	041	790	025
L43-B	Línea aérea por fase	002	029	031	052	1.968	031
L44-A	Línea aérea por fase	002	029	031	051	1.912	031

L44-B	Línea aérea por fase	002	029	031	052	1.914	031
L45-A	Línea aérea por fase	002	029	031	051	1.847	031
L46-A	Línea aérea por fase	003	019	021	035	1.282	021
L46-C	Línea aérea por fase	003	020	021	036	1.320	021
L47-A	Línea aérea por fase	003	019	021	035	1.262	021
L48-B	Línea aérea por fase	000	022	024	040	7.510	024
L50-B	Línea aérea por fase	000	022	024	040	7.330	024
L50-C	Línea aérea por fase	001	026	028	047	4.342	028
L51-B	Línea aérea por fase	000	022	024	040	7.150	024
L51-C	Línea aérea por fase	001	026	028	047	4.237	028
T33-C	Transformador con dos devanados	000	023	024	034	6.965	024
T46-B	Transformador con dos devanados	000	031	032	047	6.958	032
T6-A	Transformador con dos devanados	000	028	029	044	12.173	029
T8-B	Transformador con dos devanados	000	027	028	041	10.479	028

Tabla 4: Líneas y transformadores que presentan problemas de armónicos.

Los niveles de distorsión armónica permitidos en la corriente se rigen conforme el estándar IEEE-519-1992 detallado en la Tabla 5.

Límites de distorsiones armónicas máximas permisibles en corriente para sistemas menores a 69 KV						
Relación: I_{cc}/I_L	Armónicos <11	Armónicas 11 al 16	Armónicas 17 al 22	Armónicas 23 al 34	Armónicos >34	TDD %
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Tabla 5: Nivel de distorsión armónica permitida en la corriente por el estándar IEEE-519-1992.

Para el sistema, los niveles de distorsión armónica en tensión se encuentran por debajo del 3% del THD una vez ingresados los vehículos eléctricos; siendo los límites máximos permitidos aquellos que se detallan en la Tabla 6. Esto quiere decir que las curvas de voltaje no se ven afectadas por las distorsiones armónicas de corriente existentes en el sistema.

Vn	Distorsión individual de tensión en %	THD-Vn %
≤ 69 kV	3.0	5.0
$69 \text{ kV} \leq Vn < 161$ kV	1.5	2.5
> 161 kV	1.0	1.5

Tabla 6: Límites de distorsión armónica máxima permisible en tensión.

En la Figura 3.2 se puede observar cómo estos armónicos afectan a las diferentes corrientes de línea en la red.

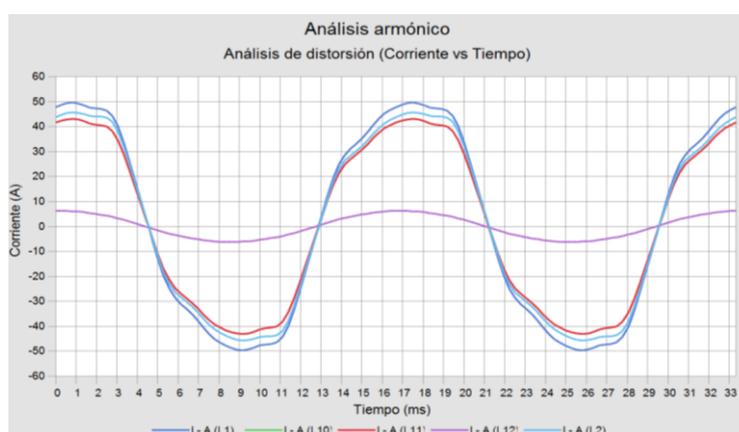


Figura 3.2: Distorsión de corriente en las líneas L1, L2, L10, L11, L12 de la fase A.

Una de las líneas más afectadas por las corrientes de distorsión armónicas es la Línea 35, la cual es mostrada en la Figura 3.3.

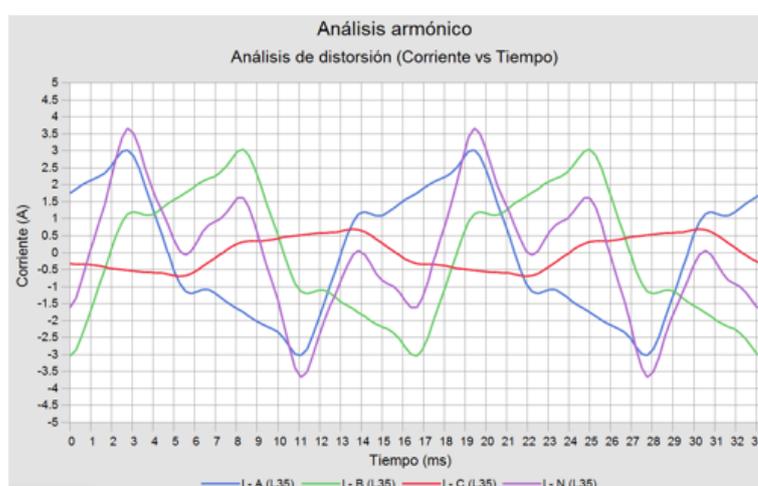


Figura 3.3: Distorsión de corriente en la Línea 35.

La gran afectación por parte de las distorsiones armónicas en las fases de esta línea es debido a que cada fase está alimentando a un transformador de distribución, en los cuales se encuentran conectados muchas de las cargas no lineales provenientes de los vehículos eléctricos.

La corriente del neutro en el circuito de 4 conductores es superior a las corrientes de desequilibrio, consiguiendo superar en algunos casos a la corriente de fase. Esto es debido a las corrientes armónicas de orden 3 las cuales están afectando a la red y se suman en el neutro.

En la Figura 3.4 se percibe que la curva de voltaje en la barra de los transformadores T32 y T33 que es alimentada por la Línea 35, no presenta problemas de distorsión armónica en tensión con esto se comprueba que la curva de voltaje en el sistema no se ve afectada por las distorsiones armónicas de corriente. Se seleccionó esta barra debido a que es alimentada por la línea que tiene más afectación armónica.

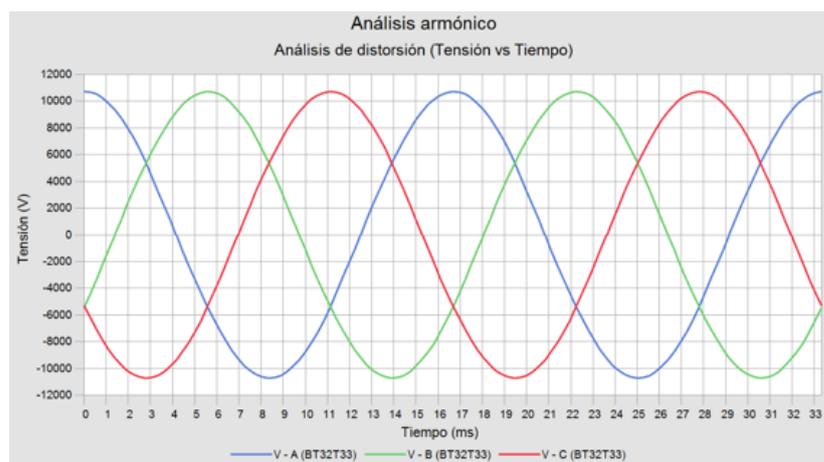


Figura 3.4: Distorsión de tensión armónica en barra de T32 y T33.

Para evitar las sobrecargas producidas en los transformadores de distribución se realiza el cambio de los tres transformadores sobrecargados de capacidad de 37,5 kVA por transformadores de 50 kVA con los cuales se mitigaran los problemas de sobrecargas en estos. En la Tabla 7 se detalla el número de transformador que debe ser sustituido.

Transformadores a sustituir		
Transformador	Capacidad actual KVA	Capacidad a instalar KVA
T11	37,5	50
T38	37,5	50
T43	37,5	50

Tabla 7: Capacidad y número de transformador a sustituir.

Ante la problemática con los armónicos en la red, se tienen dos estrategias; la primera consiste en sobredimensionar los equipos considerando los armónicos y mantenerlos en el sistema, y la otra es eliminarlos mediante la utilización de filtros.

Sobredimensionar los equipos resulta económicamente inviable, es por esto que se opta por seleccionar y dimensionar los filtros para el sistema.

El tipo de filtro a requerir depende del número de armónicos que se desean eliminar del sistema. Se tiene dos tipos de filtros para armónicos:

- Filtros sintonizados.
- Filtros amortiguados.

El filtro sintonizado es un circuito RLC, este tiene una impedancia mínima a la frecuencia del armónico a eliminar; estos filtros son utilizados para la eliminación de armónicos individuales.

Los filtros amortiguados se utilizan generalmente para la eliminación de conjuntos de armónicos. Debido a que en el sistema solo existen problemas con los armónicos del orden 3 se descarta este tipo de filtros.

El propósito del filtro de armónicos es procurar una trayectoria a tierra de baja impedancia para los armónicos de corriente o voltaje, con el único fin de allanar su circulación a tierra y prevenir así su propagación en el resto de la red.

Se propone dos escenarios para el filtrado de armónicos uno para cada nivel de voltaje existente en el sistema.

3.1 Escenario 1.

Este escenario consiste en poner 10 filtros de simple sintonía trifásicas al nivel de 13,2 KV de 60 KVAR en varias líneas de la red con los cuales se aplacan los armónicos existentes; este escenario se detalla en la Tabla 8

Filtros de simple sintonía trifásicos de 60kvar		
Número de línea	Número de filtros	Capacidad de filtro (KVAR)
L21	2	60
L30	1	60
L36	2	60
L45	1	60
L47	2	60
L51	2	60

Tabla 8: Número de filtros de simple sintonía trifásicos por línea para el Escenario 1.

Número de dispositivo	Tipo de dispositivo	Corriente e fund. (Amp)	180.00 Hz IHD (%)	TH D (%)	ITI F	Isc/IL	TD D (%)
L1-A	Línea aérea por fase	042	004	005	018	301	005
L14-A	Línea aérea por fase	034	003	005	017	136	005
L15-A	Línea aérea por fase	031	004	005	019	146	005
L16-A	Línea aérea por fase	031	004	005	019	142	005
L18-A	Línea aérea por fase	031	004	005	019	139	005
L19-A	Línea aérea por fase	007	003	005	017	623	005
L2-A	Línea aérea por fase	039	004	005	018	224	005
L25-A	Línea aérea por fase	024	004	006	019	167	006
L25-B	Línea aérea por fase	026	003	004	014	157	004
L26-A	Línea aérea por fase	024	004	006	019	164	006
L26-B	Línea aérea por fase	024	003	004	013	166	004
L28-A	Línea aérea por fase	023	004	006	020	175	006
L28-B	Línea aérea por fase	024	003	004	013	163	004
L31-A	Línea aérea por fase	021	004	006	022	187	006
L31-B	Línea aérea por fase	022	003	004	012	178	004
L33-A	Línea aérea por fase	005	007	010	034	726	010
L33-B	Línea aérea por fase	006	006	007	016	563	007
L34-A	Línea aérea por fase	005	007	010	034	706	010
L34-B	Línea aérea por fase	006	009	009	011	579	009
L34-C	Línea aérea por fase	005	006	006	003	686	006
L35-A	Línea aérea por fase	005	007	008	016	710	008
L35-B	Línea aérea por fase	006	009	009	011	563	009
L35-C	Línea aérea por fase	005	006	006	003	666	006
L36-A	Línea aérea por fase	002	007	010	034	1.334	010

L36-C	Línea aérea por fase	003	004	005	006	1.315	005
L37-B	Línea aérea por fase	002	005	011	045	1.933	011
L38-A	Línea aérea por fase	015	005	006	013	240	006
L4-A	Línea aérea por fase	039	004	005	018	207	005
L41-A	Línea aérea por fase	008	005	007	024	422	007
L41-B	Línea aérea por fase	008	003	004	015	465	004
L43-A	Línea aérea por fase	008	005	007	021	454	007
L43-B	Línea aérea por fase	007	005	005	010	471	005
L44-A	Línea aérea por fase	002	007	010	034	1.349	010
L44-B	Línea aérea por fase	002	010	012	035	1.352	012
L45-A	Línea aérea por fase	002	007	010	034	1.306	010
L46-A	Línea aérea por fase	005	007	008	015	653	008
L46-C	Línea aérea por fase	005	003	004	016	659	004
L47-A	Línea aérea por fase	003	006	008	027	1.059	008
L48-B	Línea aérea por fase	005	009	009	003	675	009
L50-B	Línea aérea por fase	005	009	009	003	661	009
L50-C	Línea aérea por fase	005	005	005	006	676	005
T33-C	Transformador con dos devanados	000	006	007	030	6.995	007
T46-B	Transformador con dos devanados	000	008	010	042	6.991	010
T6-A	Transformador con dos devanados	000	009	011	040	12.20 2	011
T8-B	Transformador con dos devanados	000	007	009	037	10.51 3	009

Tabla 9: Valores de TDD e IHD con filtros de simple sintonía trifásicas de 60 kVAR

En la Tabla 9 se observa como los valores de TDD e IHD disminuyeron significativamente en comparación a los obtenidos sin filtros armónicos obteniendo así valores aceptables los cuales cumplen con el estándar IEEE-519-1992.

La normalización de la distorsión armónica permitida en el sistema eléctrico ecuatoriano se rige en la norma IEC 61000-4-7 que tolera un nivel de THD del 8% para niveles de voltaje menores o iguales a 40 KV.

3.2 Escenario 2.

El Escenario 2 consiste en poner 11 filtros de simple sintonía monofásicos de 30 kVAR y 2 filtros de 25 kVAR en el lado de baja tensión de los transformadores de distribución; este escenario es detallado en la Tabla 10.

Filtros de simple sintonía monofásicos		
Número del Transformador	Número de filtros	Capacidad Filtro [KVAR]
T8	1	25
T18	1	30
T25	1	30
T30	1	30
T31	1	30
T32	1	30
T33	1	30
T39	1	30
T40	1	30
T41	1	30
T42	1	30
T46	1	30
T47	1	25

Tabla 10: Filtros de simple sintonía monofásica por transformador para escenario 2.

Número de dispositivo	Tipo de dispositivo	Corriente fund. (Amp)	180.00 Hz IHD (%)	THD (%)	ITIF	Isc/IL	TDD (%)
L1-A	Línea aérea por fase	037	006	007	020	338	007
L14-A	Línea aérea por fase	028	005	007	021	169	007
L15-A	Línea aérea por fase	023	005	008	025	197	008
L16-A	Línea aérea por fase	023	005	008	025	190	008
L18-A	Línea aérea por fase	023	005	008	025	187	008
L19-A	Línea aérea por fase	005	007	009	023	810	009

L2-A	Línea aérea por fase	034	006	007	021	257	007
L25-A	Línea aérea por fase	018	005	007	026	227	007
L25-B	Línea aérea por fase	018	005	007	020	226	007
L28-A	Línea aérea por fase	015	005	008	029	260	008
L28-B	Línea aérea por fase	015	005	007	022	265	007
L31-A	Línea aérea por fase	015	005	008	029	255	008
L31-B	Línea aérea por fase	014	006	007	020	282	007
L33-A	Línea aérea por fase	003	007	011	045	1.056	011
L33-B	Línea aérea por fase	003	006	010	035	1.117	010
L34-A	Línea aérea por fase	003	007	011	045	1.027	011
L34-B	Línea aérea por fase	002	007	011	045	2.043	011
L34-C	Línea aérea por fase	001	004	005	011	2.752	005
L35-A	Línea aérea por fase	002	006	011	045	1.993	011
L35-B	Línea aérea por fase	002	007	011	045	1.984	011
L35-C	Línea aérea por fase	001	004	005	011	2.677	005
L36-A	Línea aérea por fase	002	007	011	045	1.939	011
L36-C	Línea aérea por fase	001	004	005	012	2.614	005
L37-B	Línea aérea por fase	002	007	011	045	1.930	011
L38-A	Línea aérea por fase	010	003	005	019	351	005
L4-A	Línea aérea por fase	034	006	007	021	237	007
L41-A	Línea aérea por fase	006	004	008	033	610	008
L41-B	Línea aérea por fase	003	006	010	035	1.086	010
L43-A	Línea aérea por fase	004	005	009	036	806	009

L43-B	Línea aérea por fase	002	007	011	045	2.012	011
L44-A	Línea aérea por fase	002	006	011	045	1.958	011
L44-B	Línea aérea por fase	002	007	011	045	1.962	011
L45-A	Línea aérea por fase	002	006	011	045	1.895	011
L46-A	Línea aérea por fase	003	004	007	029	1.306	007
L46-C	Línea aérea por fase	003	005	008	031	1.345	008
L47-A	Línea aérea por fase	003	004	007	029	1.286	007
L48-B	Línea aérea por fase	001	013	013	009	3.249	013
L50-B	Línea aérea por fase	001	013	013	009	3.192	013
L50-C	Línea aérea por fase	001	004	007	024	2.650	007
T33-C	Transformador con dos devanados	001	005	005	012	2.535	005
T46-B	Transformador con dos devanados	001	008	008	019	3.052	008
T6-A	Transformador con dos devanados	000	014	015	041	12.181	015
T8-B	Transformador con dos devanados	001	007	007	017	4.547	007

Tabla 11: Valores de TDD e IHD con filtros de simple sintonía monofásicos usados en el Escenario 2

Los resultados obtenidos en el Escenario 2 mostrados en la Tabla 11 también cumplen con los valores establecidos en el estándar IEEE-519-1992.

Comparando estos dos escenarios se nota que existe una mínima diferencia de 2% entre estos resultados, obteniendo mejores resultados con el Escenario 1; pero uno de los inconvenientes con este escenario es que su costo debido a su capacidad, nivel de voltaje y área necesaria para su implementación es mayor que el costo del Escenario 2;

Acorde a esto, resulta conveniente optar por el Escenario 2, el cual consiste en la implementación de 13 filtros de simple sintonía monofásicos en varios transformadores de la red como se lo detalla en la Tabla 10.

Una vez realizadas las modificaciones requeridas para que el sistema opere en condiciones normales conforme los estándares; tanto el cambio de los transformadores sobrecargados como la incorporación de los filtros armónicos monofásicos al sistema, se puede observar en la Figura 3.5 como la red no presenta valores fuera de los límites establecidos.

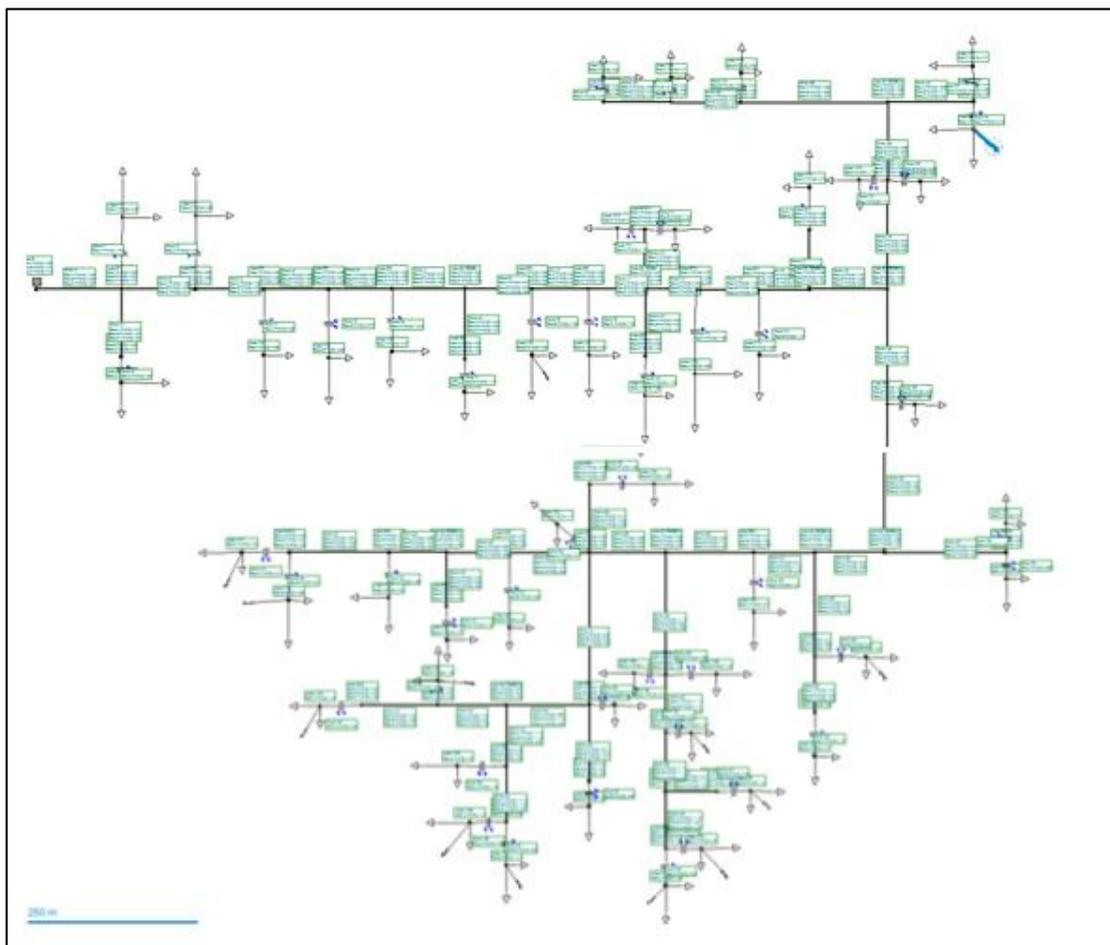


Figura 3.5: Análisis armónico y sobrecargas de transformadores de la red.

En la Figura 3.6 se nota como se suavizan las curvas de corriente en la Línea L35, una de las más afectadas por los armónicos producidos por los vehículos eléctricos; esto debido a la implementación de los filtros armónicos monofásicos en la red.

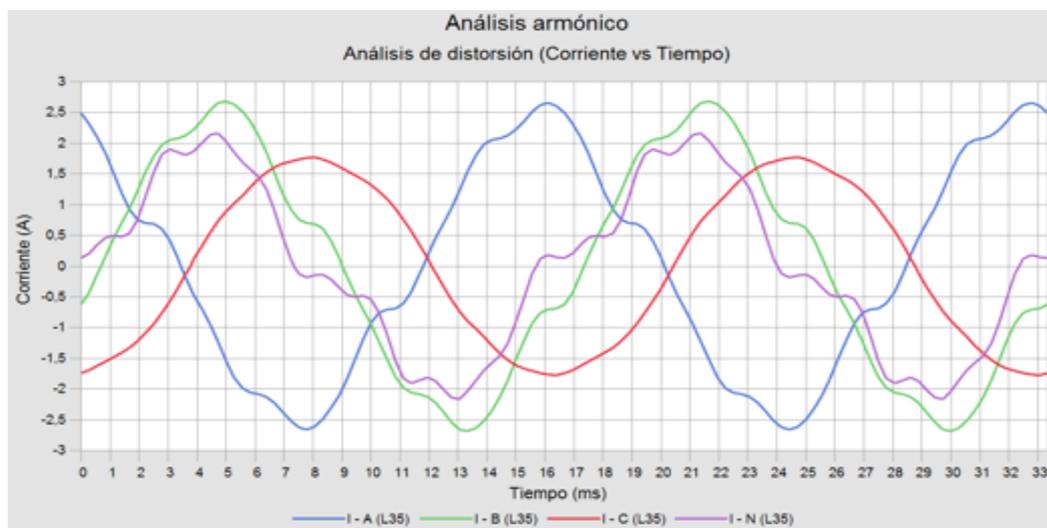


Figura 3.6: Distorsión de corriente en la línea L35 con filtros sintonizados armónicos.

3.3 Análisis de generación.

Con el ingreso de vehículos eléctricos a la red la curva de carga cambiará, y con esto la generación también se verá afectada. Por lo tanto, se deberá tomar ciertas medidas de operación para que pueda suplir la nueva demanda total.

A la curva diaria de carga presentada en la Figura 3.8 usada como base para el análisis, se le debe añadir la demanda de los vehículos eléctricos mostrada en la Figura 3.7. Esto resulta en un incremento que se ve reflejado en la Figura 3.9, la cual representa la nueva demanda total.

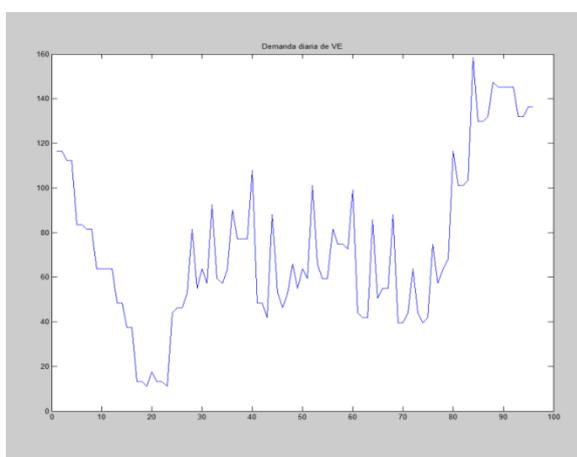


Figura 3.7: Demanda diaria de los vehículos eléctricos.

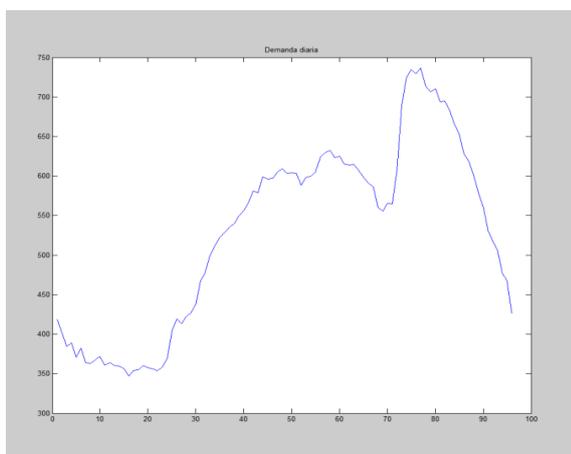


Figura 3.8: Curva diaria de carga.

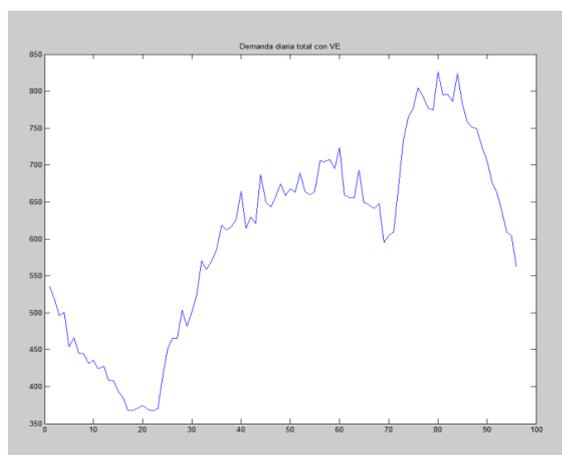


Figura 3.9: Demanda diaria total con vehículos eléctricos.

La generación deberá aumentar alrededor de un 20% debido a las nuevas cargas que se deben suplir por el ingreso de los vehículos eléctricos. Este aumento se podrá percibir desde las 18H30 hasta las 21H30, ya que existen varios vehículos conectados en estos horarios, los cuales coinciden con el horario de mayor consumo por parte de las cargas residenciales; resultando en un aumento en el pico de demanda. Una vez pasado este horario, las cargas de los vehículos conectados a la red en la noche no presentaran problemas para la generación, ya que el consumo de energía por parte de las cargas residenciales decrece significativamente.

3.4 Análisis dinámico a largo plazo.

Del análisis dinámico a largo plazo realizado en el sistema, se ve cómo se comportan las tensiones a lo largo del día. Tanto en la Figura 3.10, Figura 3.11 y Figura 3.12 se nota como los niveles de tensión en la Barra BT13 oscilan a lo largo del tiempo. Estas oscilaciones se encuentran aún dentro de los rangos permitidos por norma.



Figura 3.10: Análisis dinámico a largo plazo Voltaje VLLA en BT13.



Figura 3.11: Análisis dinámico a largo plazo Voltaje VLLB en BT13.



Figura 3.12: Análisis dinámico a largo plazo Voltaje VLLC en BT13.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con la simulación en el programa CYMDIST se tiene una percepción de lo que será el sistema estudiado una vez puesta en marcha la entrada de los vehículos eléctricos a la Isla. Dicho esto se puede concluir que:

El ingreso de los vehículos eléctricos da origen a la sobrecarga de varios transformadores que deberán ser cambiados por transformadores de mayor capacidad.

Los efectos armónicos generados por las baterías y convertidores de los vehículos eléctricos son unos de los problemas más comunes que afectan a la calidad de energía. Estos pueden acarrear innumerables problemas para el sistema.

El fenómeno armónico causa problemas tanto a los usuarios como a las empresas distribuidoras de energía eléctrica ocasionando efectos perjudiciales en los equipos de la red.

La recarga masiva de las baterías de los vehículos eléctricos dieron lugar a la existencia de corrientes de distorsión armónica en gran parte de las líneas y en varios transformadores de distribución de la red, mucho de los cuales estaban fuera de los rangos máximos permitidos por norma.

Dentro de las medidas remediales para el problema con los armónicos se encuentran la incorporación de filtros de simple sintonía en la red, se hizo el análisis armónico para dos escenarios que mitigaban estas afectaciones. Debido a que en el Escenario 1 donde se consideran unidades trifásicas a un nivel de voltaje de 13,2 KV implica mayores requerimientos de espacio y de costos, se determina el Escenario 2 como mejor opción para para el sistema.

Las recomendaciones para mejorar el funcionamiento de este sistema son las siguientes:

- Para la implementación de los filtros sintonizados armónicos se recomienda fijar una tasa de cobro para armónicos los cuales serán cobrados a los usuarios que cuenten con vehículos eléctricos.

- El exceso de corriente en el neutro debido a las corrientes armónicas produce sobrecalentamiento en el conductor y también en sus barras, por lo que se recomienda dimensionar el conductor del neutro del mismo calibre de la fase.
- Las encuestas sobre el uso de los vehículos fueron realizadas en la ciudad de Babahoyo los cuales se los tomo como referencia para el análisis. Se debe considerar que esto no refleja puramente el comportamiento de los vehículos en la isla, pero que nos sirve como precedente para poder realizar el análisis. Para un análisis más detallado se deberán realizar encuestas en la isla de la población San Cristóbal
- La configuración de los dispositivos de protección deberán ser parametrizados para este nuevo escenario; de no ser así, se corre el riesgo de un malfuncionamiento de los mismos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Gobierno de Galápagos, «Gobierno Galápagos,» 5 abril 2016. [En línea]. Available: <http://www.gobiernogalapagos.gob.ec/reglameto-vehiculos/>. [Último acceso: 3 Diciembre 2016].
- [2] J. Torres Sarmiento, *Estudio de viabilidad en la implementación de vehículos eléctricos en la ciudad de Cuenca*, Cuenca: Univ. Politecnica Salesiana, 2015.
- [3] P. d. m. d. I. Distribución, «Elecgalapagos,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.elecgalapagos.com.ec/sites/default/files/PROYECTOS%20DE%20INVERSIÓN%20PMD%202014.pdf>. [Último acceso: 6 Diciembre 2016].
- [4] Z. Chengnin y P. Liwen, «An Integrated Multifunctional Bidirectional AC/DC and DC/DC Converter for Electric Vehicles Applications,» *mdpi*, 28 Junio 2016.
- [5] A. C. Zambroni de Souza, D. Queiroz Oliveira y P. F. Ribeiro, «Overview of Plug-in Electric Vehicles Technologies,» de *Plug In Electric Vehicles in Smart Grids*, Australia, Springer, 2015, pp. 4-13.
- [6] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, «Dirección Energía Renovable,» [En línea]. Available: <http://www.energia.gob.ec/direccion-energia-renovable/>. [Último acceso: 5 Diciembre 2016].
- [7] Ergal, «Mapa de proyectos,» [En línea]. Available: <http://www.ergal.org/cms.php?c=1309>. [Último acceso: 3 Diciembre 2016].
- [8] The MathWorks, «Lithium-Ion Battery Pack With Fault,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/examples/lithium-ion-battery-pack-with-fault.html>. [Último acceso: 25 Noviembre 2016].
- [9] R. Garcia, J. Valle y P. Lopes, *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks*, New York: Springer, 2013.
- [10] R. Sumedha, S. Farhad y G. Arindam, *Plug In Electric Vehicles in Smart Grids*, New York: Springer, 2015.
- [11] Nissan USA. (2016, Noviembre 15). Powering Change [Online]. Disponible en: <https://www.nissanusa.com/electric-cars/leaf/charging-range/battery/>

ANEXOS

ANEXO A: PAQUETE DE BATERÍAS

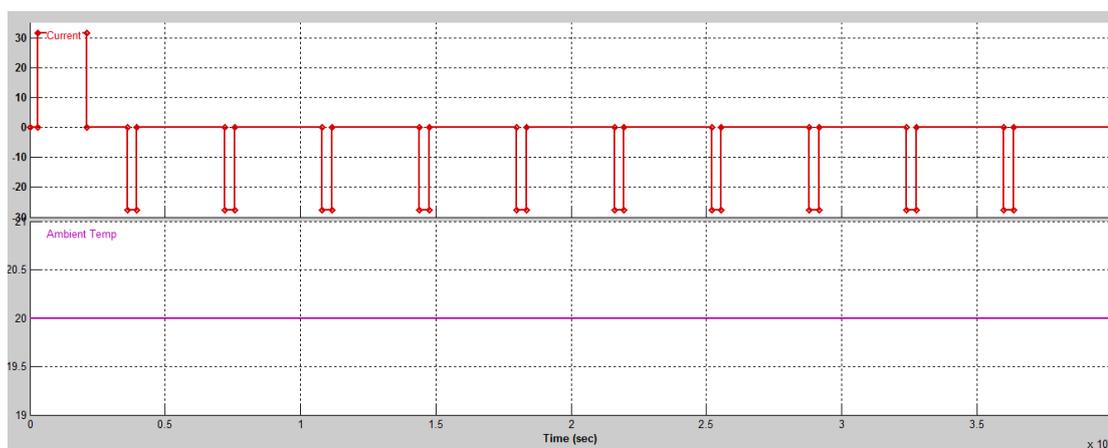


Figura A.1: Señales de entrada para el paquete de baterías de Nissan Leaf.

ANEXO B: CARACTERÍSTICAS DE LA BATERÍA DE NISSAN LEAF Y OBTENCIÓN DE PARÁMETROS

Type	Laminated lithium-ion battery
Voltage	403.2V
Nominal voltage	360V
Total capacity	24 kWh (16 kWh available, 67% DoD, 21 kWh declared)
Power output	Over 90 kW
Energy density	140 Wh/kg
Power density	2.5 kW/kg
Dimensions	61.8 x 46.8 x 10.4 in. (1570.5 x 1188 x 264.9 mm)
Weight	648 lbs
Internal Resistance	0.055106 Ohms
Number of modules	48, each with four cells (total 192 cells)
Battery pack contents:	Positive electrodes: lithium manganate Negative electrodes: carbon Cells, Modules, Assembly parts

Tabla 12: Datos del paquete de baterías de Nissan Leaf.

Number of cells	4
Construction	2 in-series pairs in parallel
Length	11.9291" (303 mm)
Width	8.7795" (223 mm)
Thickness	1.3779" (35 mm)
Weight	8.3775 lbs (3.8 kgs)
Output terminal	M6 nut
Voltage sensing terminal	M4 nut
Module fixing hole diameter	0.3582" (9.1 mm)

Tabla 13: Datos del módulo de baterías de Nissan Leaf.

Cell type	Laminate type
Cathode material	LiMn ₂ O ₄ with LiNiO ₂
Anode material	Graphite
Rated capacity (0.3C)	33.1 Ah
Average voltage	3.8 V
Length	11.417" (290 mm)
Width	8.504" (216 mm)
Thickness	0.2795" (7.1mm)
Weight	1.7624 lbs (799 g)

Tabla 14: Datos de la celda usada en el Nissan Leaf.



Figura B.1: Característica de descarga de una celda del paquete de batería de Nissan Leaf.

Voltaje Nominal (V)

El voltaje nominal del paquete de batería viene dado en las características del fabricante que en este caso es de 360 V.

El voltaje nominal depende de la configuración del paquete de batería. El paquete tiene 48 módulos en serie de 4 celdas cada uno, conectadas en dos ramales en serie y estos ramales conectados en paralelo.

$$V_{nom} = 96 * V_{nominal \ de \ la \ celda}$$

$$V_{nom} = 96 * 3.8$$

$$V_{nom} = 364.8 \ V$$

Capacidad Nominal (Ah)

Es la capacidad mínima efectiva de la batería en amperios-hora. En este caso es la capacidad que tendría un módulo del paquete de batería.

$$C_{nom} = 2 * C_{nominal \ de \ la \ celda}$$

$$C_{nom} = 2 * 33.1$$

$$C_{nom} = 66.2 \text{ Ah}$$

Estado Inicial de Carga (%)

El estado inicial de carga es la condición con la que la batería empieza a cargarse o descargarse. Se la ajustó en diferentes estados (desde 20% a 90%) para demostrar que los armónicos varían levemente.

Capacidad Máxima (Ah)

Es la capacidad máxima teórica de la batería cuando en la tensión ocurre una discontinuidad. Este parámetro es aproximadamente el 105% de la capacidad nominal.

Voltaje de Plena Carga (V)

Es el voltaje para una corriente de descarga. No es el voltaje en vacío. En la característica de descarga podemos observar que cuando la celda está completamente cargada tiene un voltaje de 4.25 V. Entonces:

$$V_{pc} = 96 * V_{cc \ de \ la \ celda}$$

$$V_{pc} = 96 * 4.25$$

$$V_{pc} = 408 \text{ V}$$

Corriente Nominal de Descarga (A)

Es el 20% de la capacidad nominal.

$$I_{nom} = 0.2 * C_{nom}/1h$$

$$I_{nom} = 0.2 * 66.2/1h$$

$$I_{nom} = 13.24 \text{ A}$$

Resistencia Interna (Ohms)

La resistencia es constante mientras la batería se está cargando o descargando. No varía con la corriente.

Capacidad a Voltaje Nominal (Ah)

La capacidad que se puede obtener hasta que el voltaje es más bajo que el voltaje nominal. Según la característica de descarga del paquete de batería es de 42 Ah.

La Zona Exponencial [Voltaje (V) Capacidad (Ah)]

Se lo obtiene de la parte final de la parte exponencial de la característica de descarga. Debe estar entre el voltaje nominal y el voltaje de plena carga.

$$V_e = 96 * V_e \text{ de la celda}$$

$$V_e = 96 * 4.1$$

$$V_e = 393.6 \text{ V}$$

Según la curva de descarga la capacidad es de 3.2 Ah.

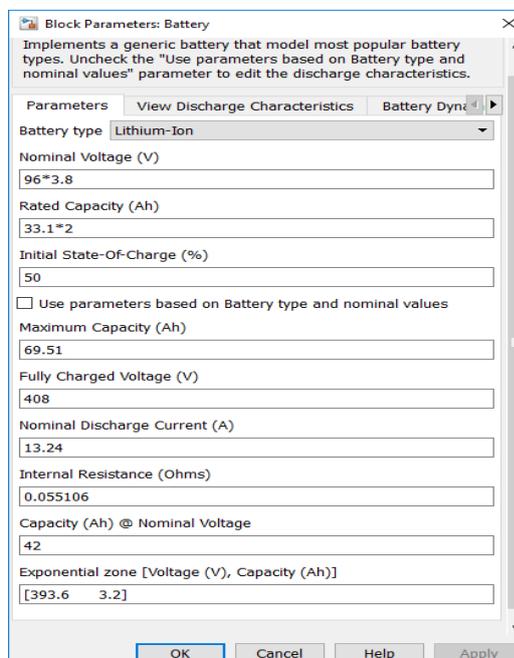


Figura B.2: Parámetros configurados en el bloque Battery de Simulink.

ANEXO C: ESQUEMA DEL CONVERTIDOR Y BATERÍA DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

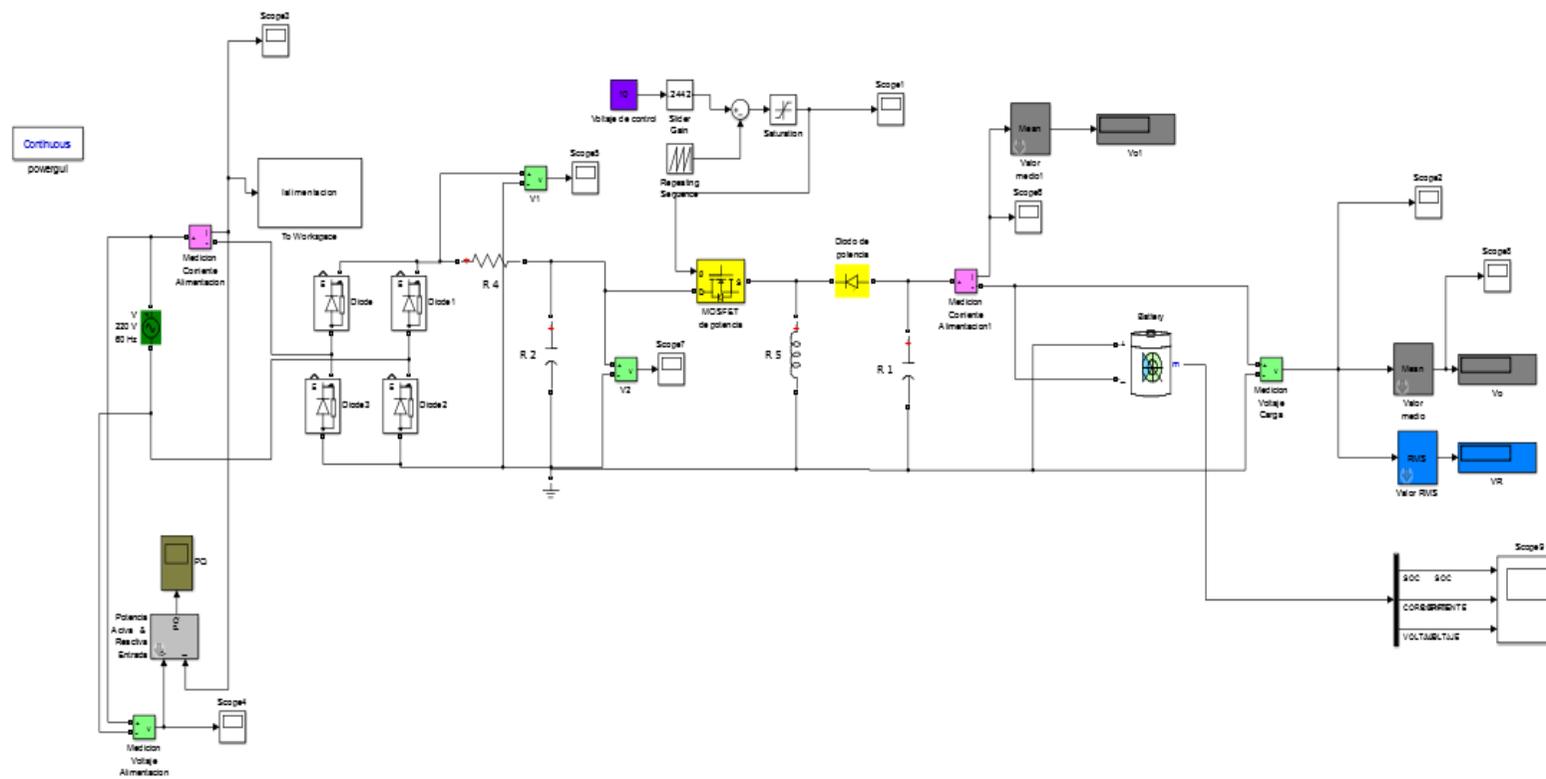


Figura C.1: Conjunto convertidor y batería del Vehículo Eléctrico.

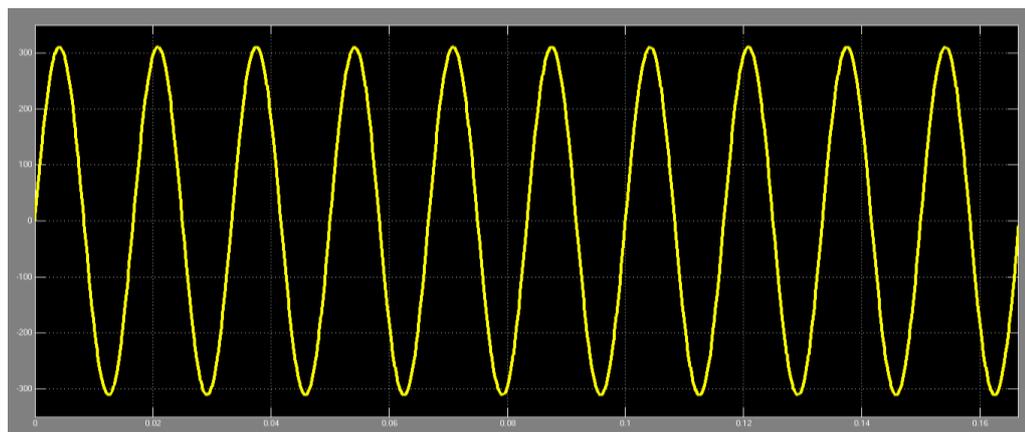


Figura C.2: Voltaje de alimentación del convertidor.

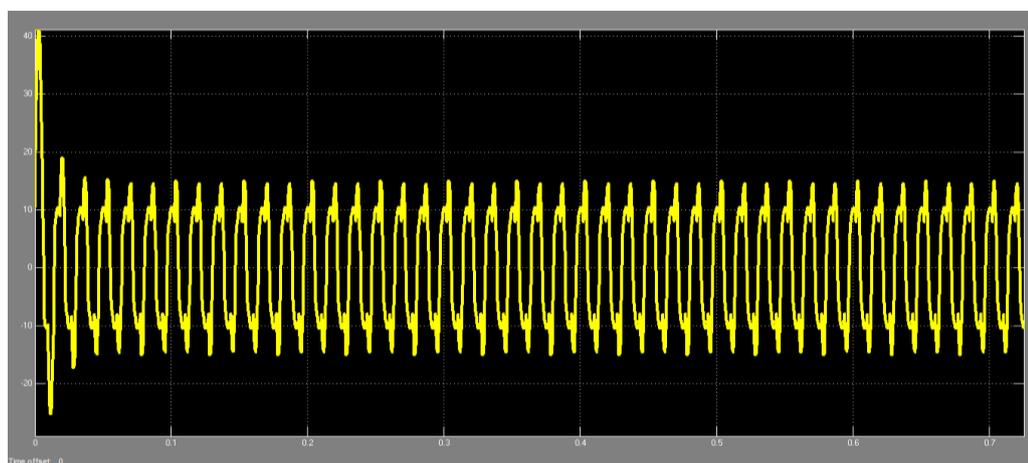


Figura C.3: Corriente de alimentación del convertidor.

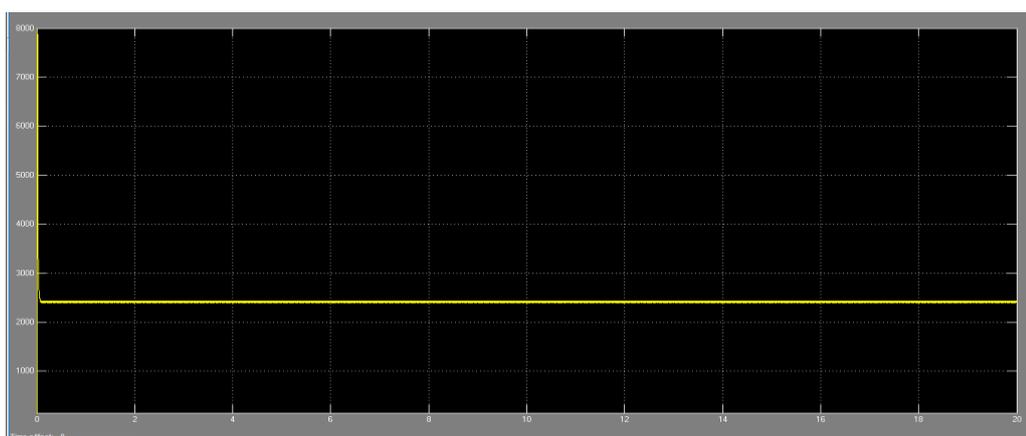


Figura C.4: Potencia consumida por el Vehículo Eléctrico.

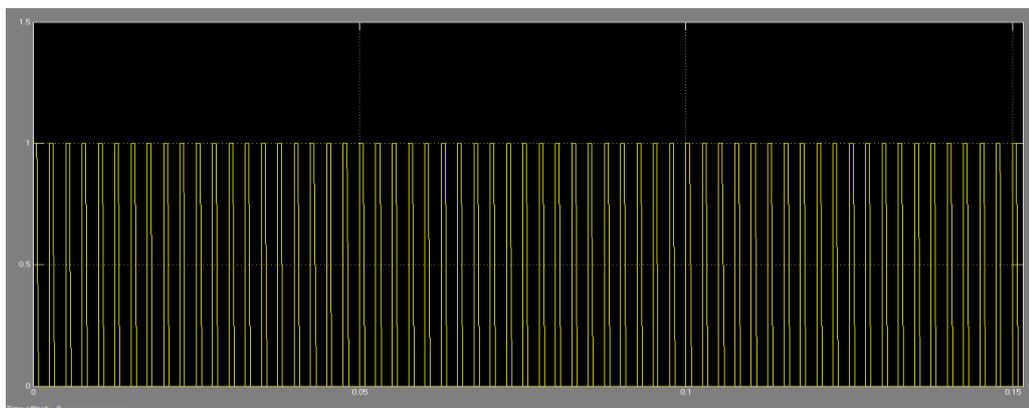


Figura C.5: Disparos del MOSFET de potencia.

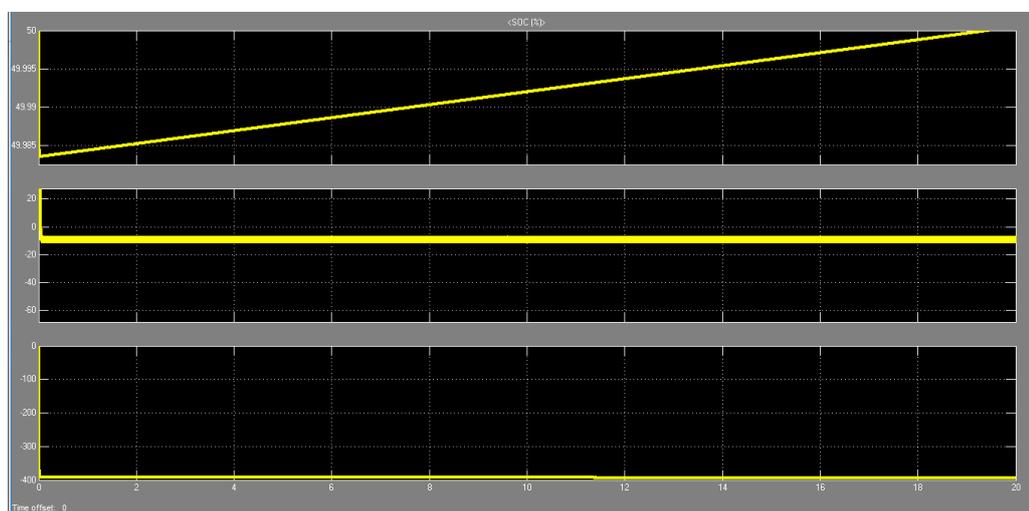


Figura C.6: Estado de carga, corriente y voltaje de la batería.

ANEXO D: DISTORSIÓN ARMÓNICA PARA DIFERENTES ESTADOS DE CARGA

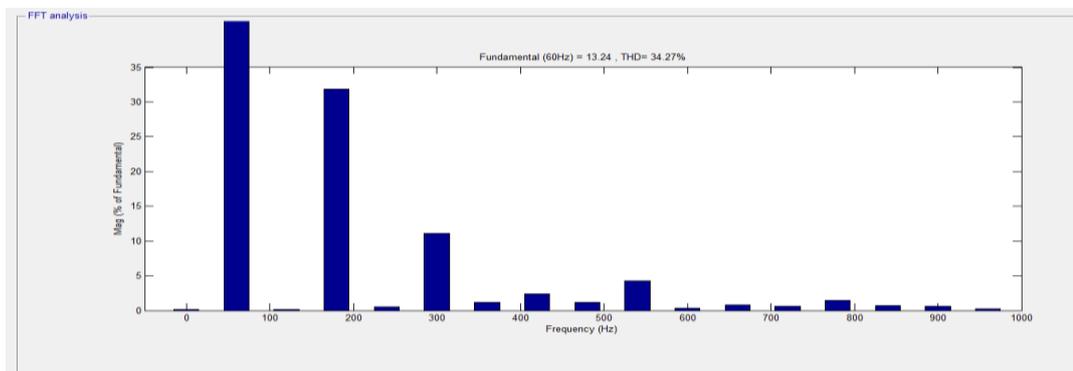


Figura D.1: Distorsión Armónica con 20% de estado de carga.

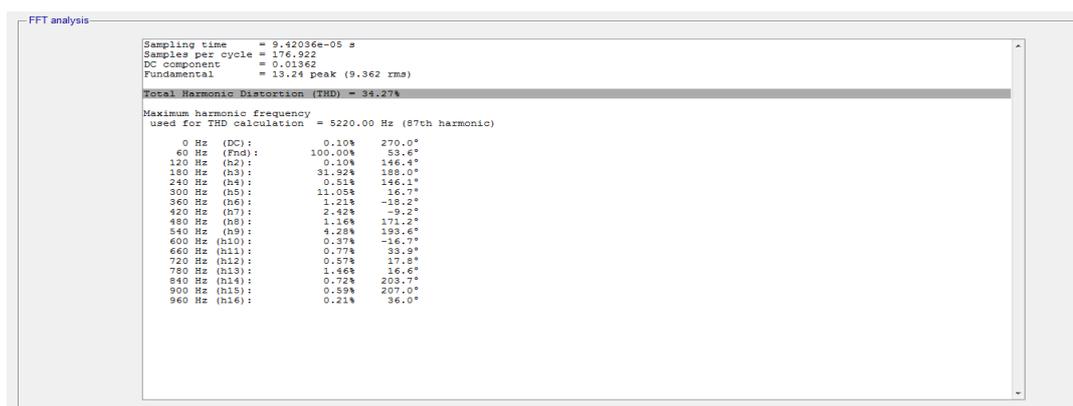


Figura D.2: Resultados de Distorsión Armónica con 20% de estado de carga.

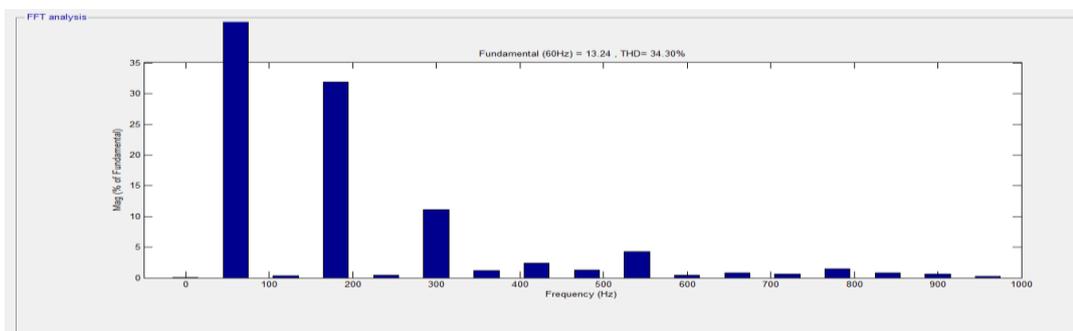


Figura D.3: Distorsión Armónica con 30% de estado de carga.

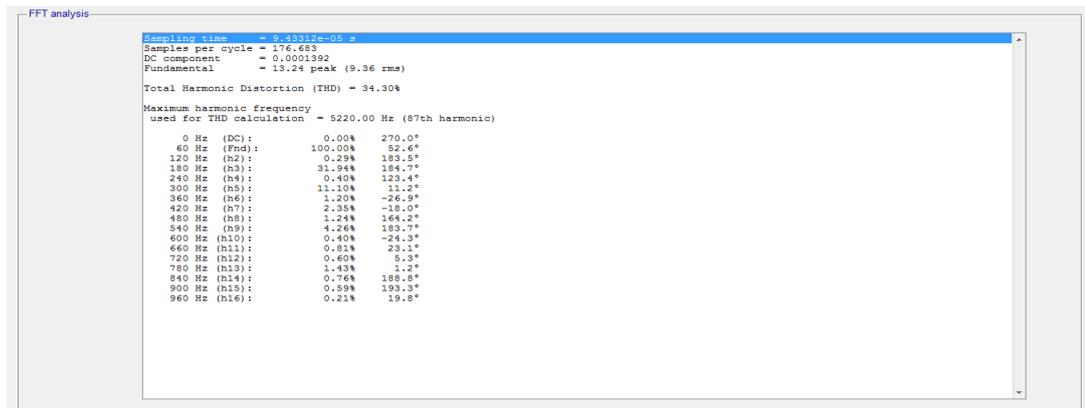


Figura D.4: Resultados de Distorsión Armónica con 30% de estado de carga.

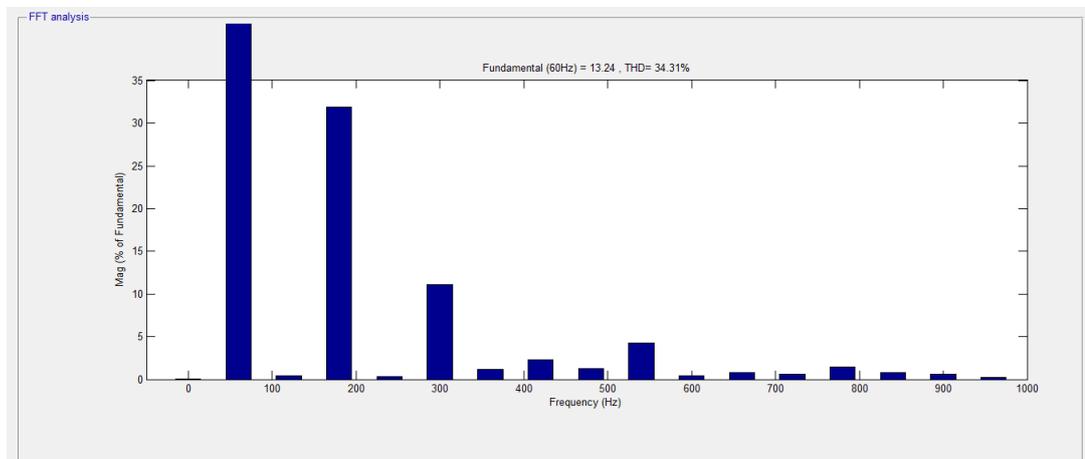


Figura D.5: Distorsión Armónica con 40% de estado de carga.

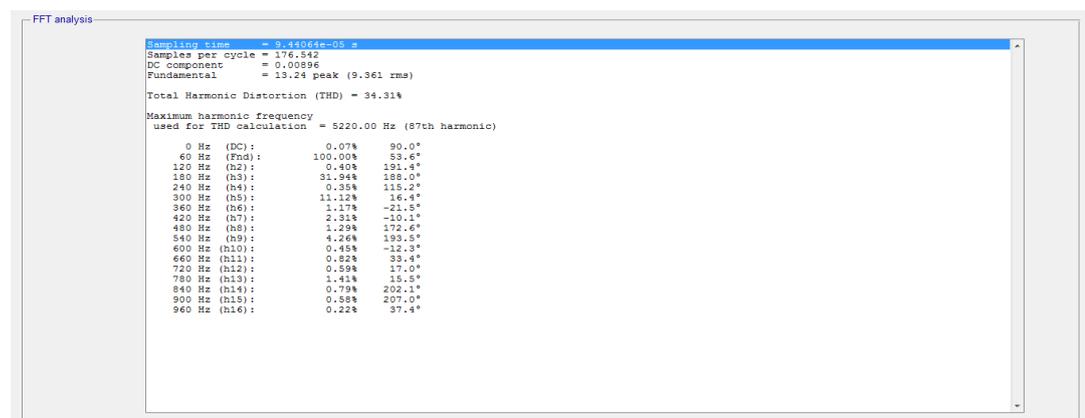


Figura D.6: Resultados de Distorsión Armónica con 40% de estado de carga.

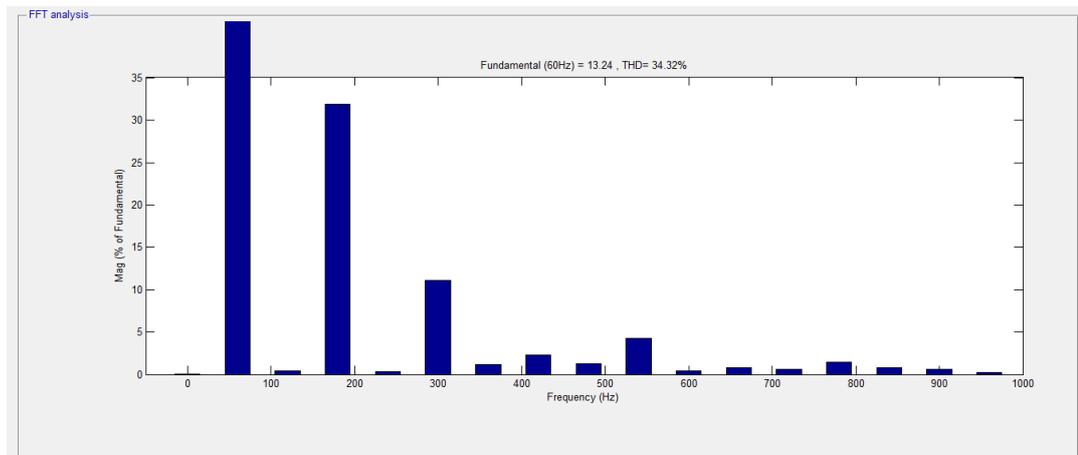


Figura D.7: Distorsión Armónica con 50% de estado de carga.

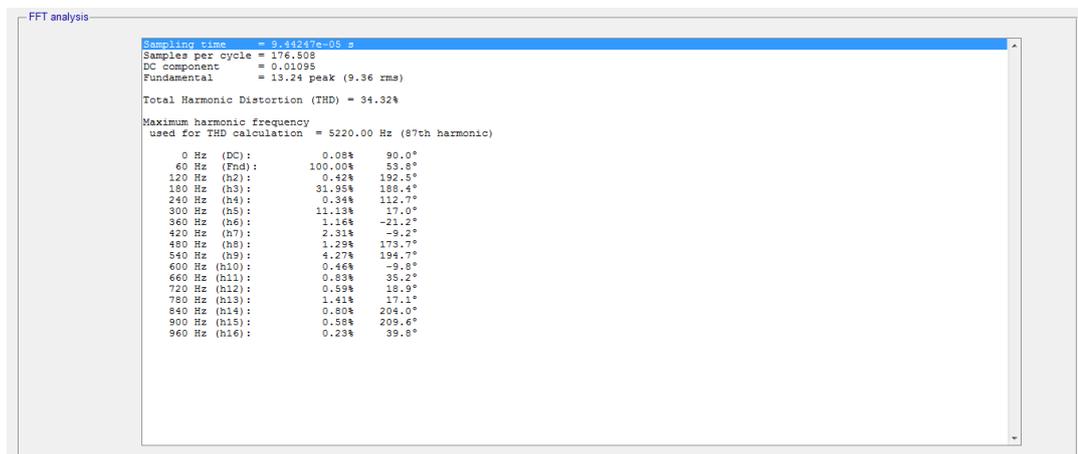


Figura D.8: Resultados de Distorsión Armónica con 50% de estado de carga.

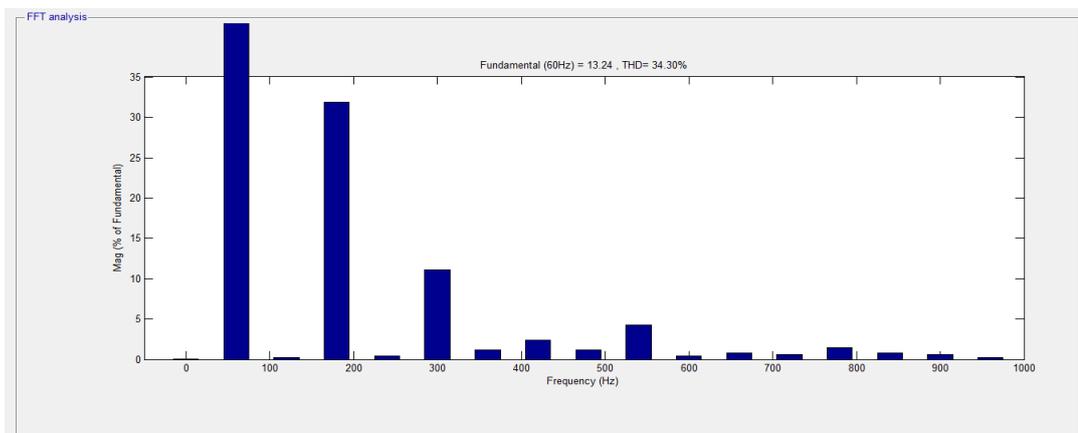


Figura D.9: Distorsión Armónica con 60% de estado de carga.

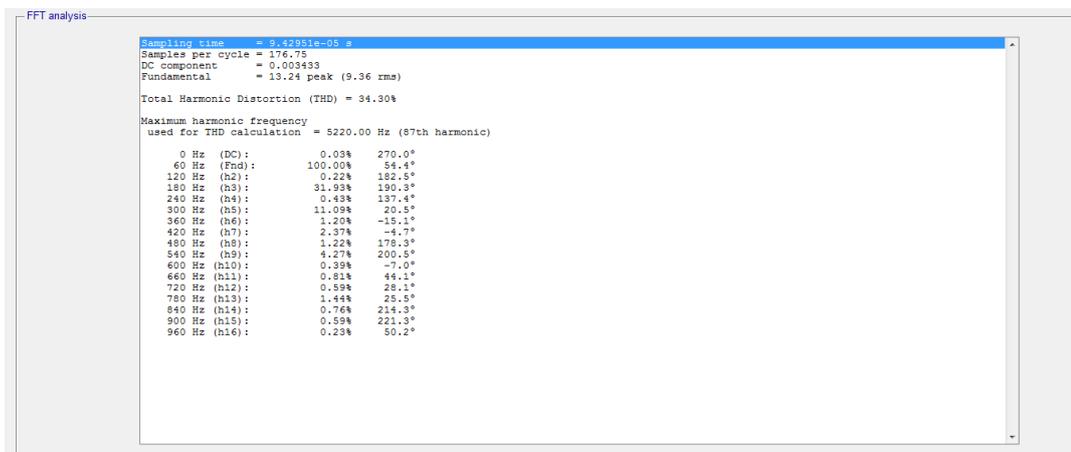


Figura D.10: Resultados de Distorsión Armónica con 60% de estado de carga.

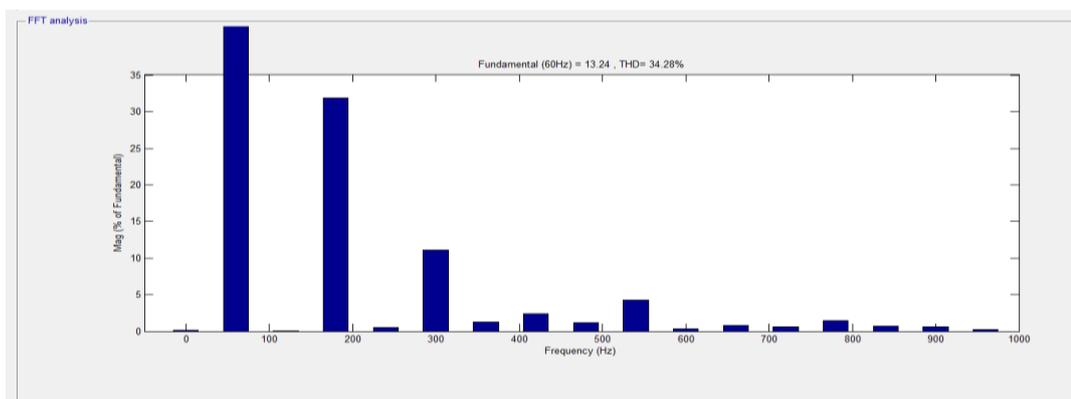


Figura D.11: Distorsión Armónica con 70% de estado de carga.

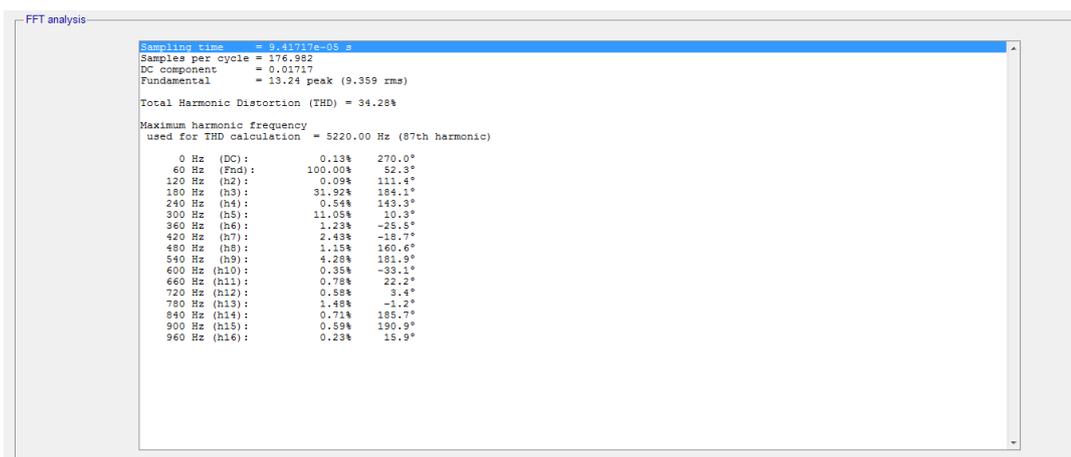


Figura D.12: Resultados de Distorsión Armónica con 70% de estado de carga.

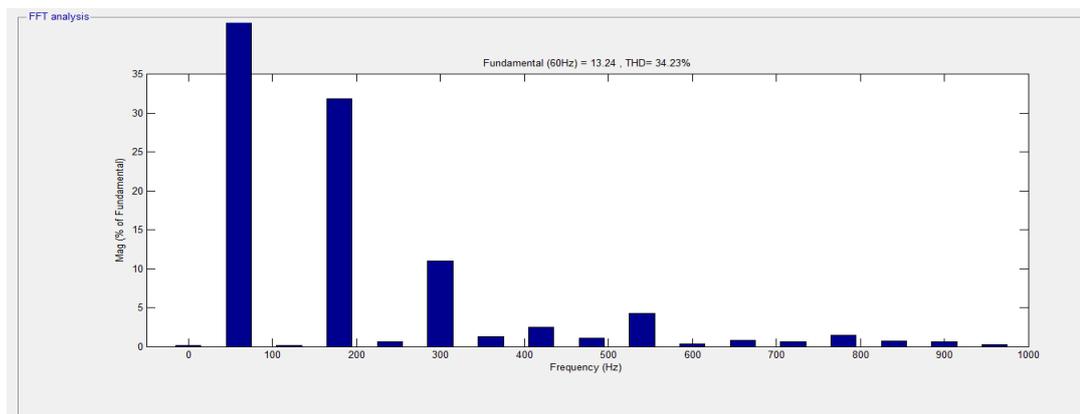


Figura D.13: Distorsión Armónica con 80% de estado de carga.

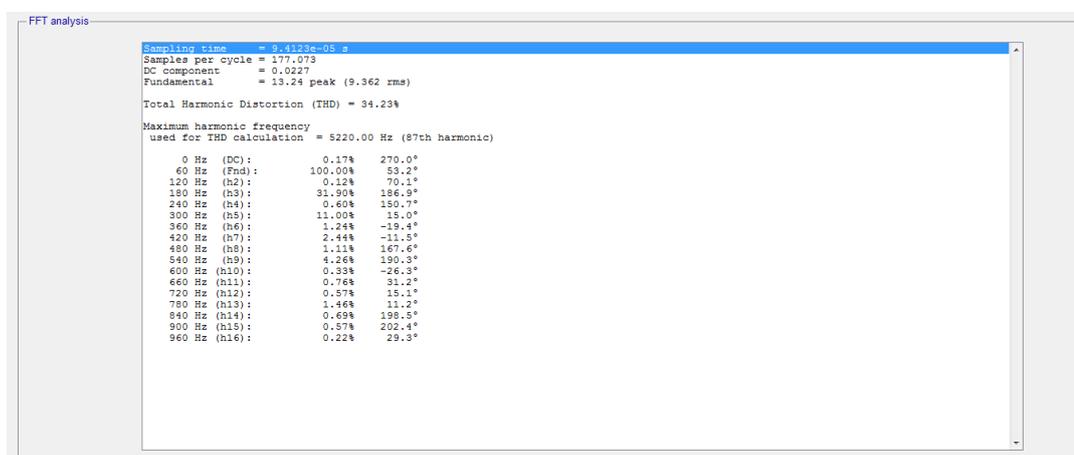


Figura D.14: Resultados de Distorsión Armónica con 80% de estado de carga.

ANEXO E: DATOS DE TRANSFORMADORES

Acometidas por transformador

Transformador	Acometidas aéreas	Acometidas subterráneas
1	18	0
2	28	0
3	0	29
4	1	0
5	1	0
6	0	1
7	0	1
8	29	0
9	0	1
10	29	0
11	29	0
12	29	0
13	28	0
14	29	0
15	29	0
16	29	0
17	0	1
18	18	0
19	0	1
20	17	0
21	17	0
22	18	0
23	17	0
24	18	0
25	17	0
26	17	0
27	0	1
28	34	0
29	0	1
30	7	0
31	7	0
32	0	1
33	1	0
34	1	0

35	1	0
36	7	0
37	7	0
38	7	0
39	7	0
40	34	0
41	34	0
42	34	0
43	0	1
44	0	1
45	34	0
46	33	0
47	0	1
48	7	0

Tabla 15: Acometidas aéreas y subterráneas por transformador.

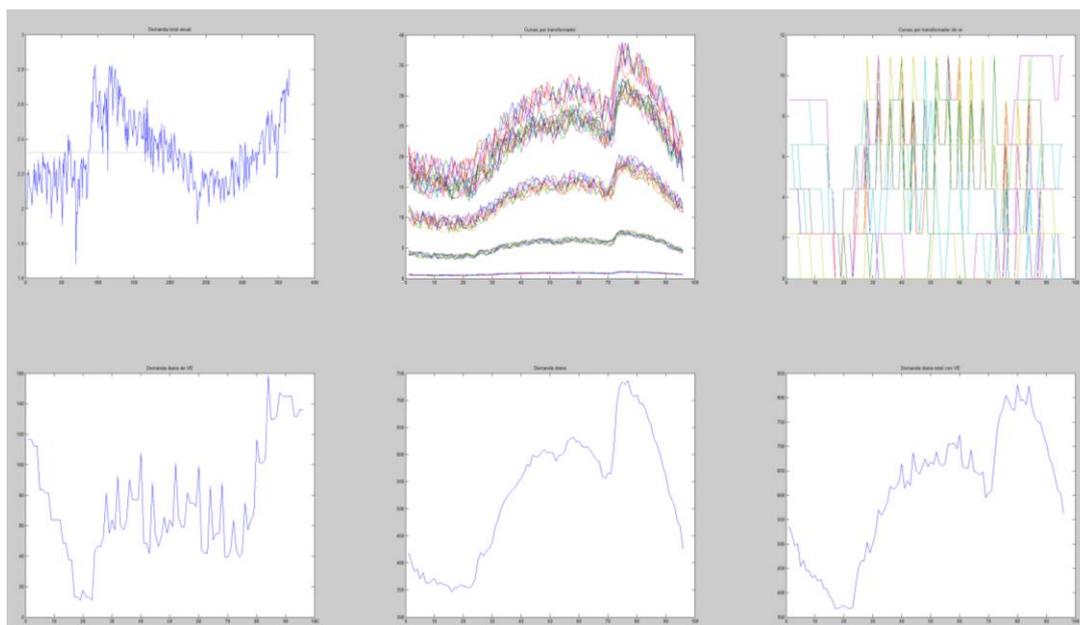


Figura E.1: Curvas de demanda del sistema.

ANEXO F: ENCUESTAS Y RESULTADOS

Modelo de encuesta realizada.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.

PROYECTO INTEGRADOR

“IMPACTO DE LOS AUTOS ELÉCTRICOS EN SAN CRISTOBAL GALAPAGOS”.

Cuestionario dirigido a domicilios de familias que posean vehículos.

Con el fin de recoger información sobre el uso de vehículos de los distintos domicilios, para poder estimar un patrón de comportamiento que permita realizar nuestro estudio.

Atención:

El presente cuestionario es de carácter anónimo, por lo cual no se solicitará información personal específica de los encuestados, únicamente preguntas basadas en como usted usa su vehículo.

ENCUESTA

CIUDAD: _____

¿Posee usted o el lugar dónde usted reside un vehículo automóvil?

SI___ NO___

Si la respuesta es “SI”, por favor responda las siguientes preguntas”

¿Cuántos vehículos poseen en su domicilio? Marque la casilla correspondiente:

#	de	Indique:
	Vehículos	
1		<input type="checkbox"/>
2		<input type="checkbox"/>
3		<input type="checkbox"/>
4		<input type="checkbox"/>
otros		¿Cuántos?: _____

¿Cuántas personas habitan en total en su domicilio?

# de personas	
Indique una cantidad	_____

¿Cuántas personas en total de su domicilio poseen licencia de conducir?

# de personas con licencia	
Indique una cantidad	_____

¿Cuál es el principal uso del vehículo o de los vehículos?

Uso de Vehículos	Indique:
Para movilización, es decir para ir al su trabajo, ir a hacer compras, etc.	<input type="checkbox"/>
Trabajo, si su actividad económica depende del uso de su vehículo.	<input type="checkbox"/>
Si el único uso de su vehículo es para placer, es decir solo lo usa para actividades relacionadas con el ocio.	<input type="checkbox"/>
otros	_____

¿Cuántas horas en promedio usa su vehículo en un día de **lunes a viernes**?, si posee más de uno indique un número de horas estimado de uso por cada uno. **NOTA:** Considere las horas de uso, como el número de horas en que el vehículo se encuentra en movimiento.

# Vehículo	Promedio de horas de uso diario.
1	
2	
3	
Si es una cantidad mayor indique una cantidad estimada.	

¿Cuántas horas en promedio usa su vehículo en un día **Sábado o Domingo**?, si posee más de uno indique un número de horas estimado de uso por cada uno. **NOTA:** Considere las horas de uso, como el número de horas en que el vehículo se encuentra en movimiento.

# Vehículo	Promedio de horas de uso diario.
1	
2	
3	
Si es una cantidad mayor indique una cantidad estimada.	

¿En qué horas generalmente, los vehículos se encuentran en casa si ser utilizados?

Por ejemplo:

# Vehículo	Horas de no uso
1	15:00- 8:00
2	19:00 – 6:00
3	Durante la noche
Si es una cantidad mayor indique una cantidad estimada.	

Por favor llene a continuación:

# Vehículo	Horas de no uso
1	
2	
3	
Si es una cantidad mayor indique una cantidad estimada.	

Responsable: _____

	Número de vehículos	Número de personas	Número de licencias	Horas de uso
1	42			7
2	8		30	11
3			7	15

4		12	6	12
5		25	7	5
6		6		
7		7		

Tabla 16: Resultados de encuestas.

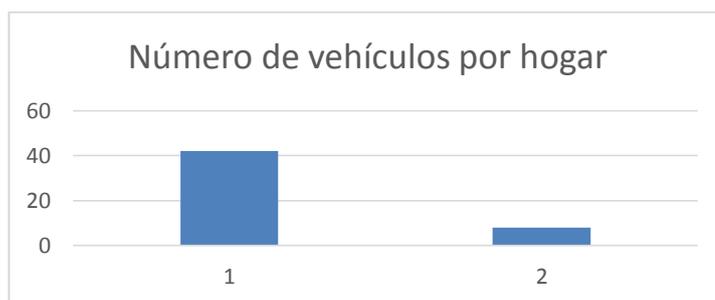


Figura F.1: Número de vehículos por hogar.



Figura F.2: Número de personas en la familia.

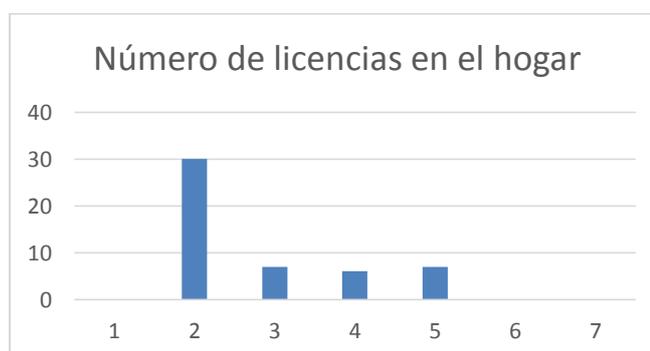


Figura F.3: Número de personas con licencia de conducir en el hogar en el hogar.

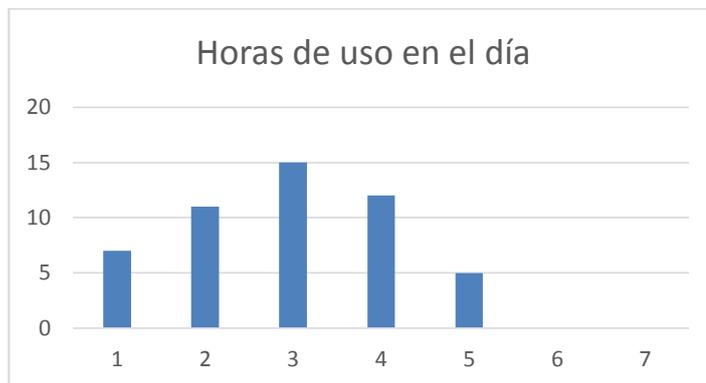


Figura F.4: Horas de uso del vehículo al día.

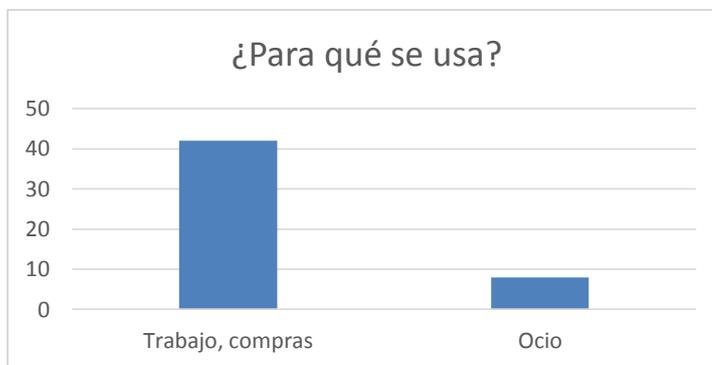


Figura F.5: Motivos de uso del vehículo.

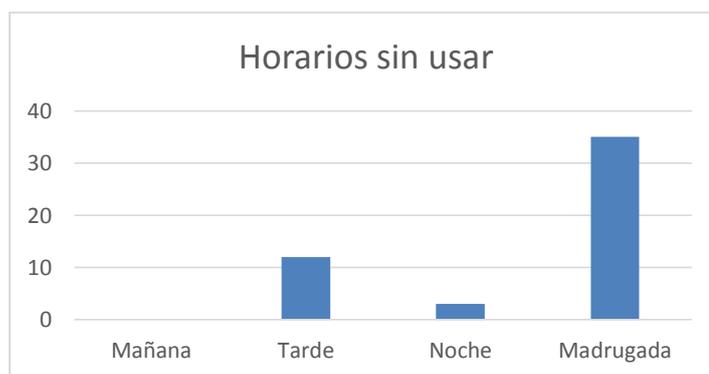


Figura F.6: Horarios en que no se usa el vehículo.