

**MÉTODO PARA EL ANÁLISIS DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN REDES DE
DISTRIBUCIÓN QUE ALIMENTAN ESTACIONES DE RECARGA DE
VEHÍCULOS ELÉCTRICOS**

**BRAYAN ALBERTO GARCÍA VARGAS
DANIEL ALBERTO AMADO PINZÓN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2020**

**MÉTODO PARA EL ANÁLISIS DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN REDES DE
DISTRIBUCIÓN QUE ALIMENTAN ESTACIONES DE RECARGA DE
VEHÍCULOS ELÉCTRICOS**

**BRAYAN ALBERTO GARCÍA VARGAS
DANIEL ALBERTO AMADO PINZÓN**

Proyecto de grado para optar al título de: Ingeniero Eléctrico

Director

OSCAR ARNULFO QUIROGA QUIROGA

Dr. en Tecnología

Codirector

MARÍA ALEJANDRA MANTILLA VILLALOBOS

Dra. en Ingeniería

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2020

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. REQUERIMIENTOS PARA LA SIMULACIÓN ARMÓNICA DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN CON ESTACIONES DE RECARGA	16
1.1 MODALIDADES DE CARGA	17
1.2 BATERÍAS	19
1.2.1. Modelado en simulink.	21
1.3 ESTACIONES DE RECARGA	24
1.3.1 Convertidor DC/DC.	26
1.3.2. Topología del convertidor DC/DC.	26
1.3.3. Control del convertidor DC/DC.....	28
1.3.4. Modelado en simulink del convertidor DC/DC.....	29
1.3.5. Convertidor AC/DC.	30
1.3.6. Topología del convertidor AC/DC.....	31
1.3.7. Control del convertidor AC/DC.....	34
1.3.8. Modelado en simulink del convertidor ac/dc.	35
1.4. NIVEL DE TENSIÓN.....	37
1.5. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	37
1.5.1. Radial.....	37
1.5.2. Anillo y Malla.....	38
1.6. MODELOS DE CARGAS PARA EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.....	39
1.7 MODELAMIENTO DE LAS CARGAS PARA ANÁLISIS ARMÓNICO	40
2. DISEÑO Y FORMULACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.....	42
2.1 DISEÑO DEL MODELO DE ESTACIÓN.....	42
2.2. SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA (SDEE)	44
2.2.1. Modelo de 33 barras.	44
2.2.2. Modelo de 11 barras.	45

2.3. MÉTODOS PARA EL DESARROLLO DEL FLUJO DE POTENCIA EN EL SISTEMA.	49
2.3.1. Backward / forward Sweep (barrido hacia atrás / adelante).....	49
2.3.2 Método de enfoque directo para solución de flujo de potencia.	51
2.4 FLUJO DE POTENCIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN RADIALES DESBALANCEADOS.....	55
2.4.1. Backward/forward sweep para sistemas desbalanceados.....	56
2.4.2. Método de enfoque directo para solución de flujo de potencia en sistemas desbalanceados.....	58
2.5. FLUJO DE POTENCIA ARMÓNICO.....	61
2.6 PLANTEAMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO	62
2.6.1. Sistema de 33 barras sin estaciones incorporadas.....	62
2.6.2. Sistema de 11 barras sin estaciones incorporadas.....	68
2.6.3. Incorporación de las estaciones en el sistema de 33 barras según la cantidad ve y modo de operación.	69
2.6.4. Casos de estudio para el modelo de 33 barras.....	70
2.6.5. Incorporación de las estaciones en el sistema de 11 barras según la cantidad ve y modo de operación.	72
2.6.6. Casos de estudio para el modelo de 11 barras.....	72
3. RESULTADOS DE LOS CASOS DE ESTUDIO Y FORMULACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN	74
3.1. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS CASOS DE ESTUDIO.....	74
3.1.1. Caso 1.....	74
3.1.2. Caso 2.....	77
3.1.3. Caso 3.....	80
3.1.4. Caso 4.....	82
3.1.5. Caso 5.....	85
3.2. NORMATIVA PARA LA INSTALACIÓN ADECUADA DE ESTACIONES DE VE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN	88

3.3. MODELAMIENTO Y ANÁLISIS DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	90
3.4. MODELAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA ESTACIÓN DE CARGA QUE SERÁ CONECTADA AL SISTEMA.....	91
3.5. SIMULACIÓN DEL SISTEMA DESPUÉS DE LA INCORPORACIÓN DE LAS ESTACIONES	91
3.6. CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE DISTORSIÓN ARMÓNICA	92
4. CONCLUSIONES	107
5. ESTUDIOS FUTUROS	109
BIBLIOGRAFÍA	110
ANEXOS	114

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Bloque de batería Simulink	22
Figura 2. Parámetros de descarga de la batería.....	23
Figura 3. Parámetros de descarga de la batería.....	24
Figura 4. Topología de un convertidor DC/DC para carga de baterías de VE	27
Figura 5. Diseño del control del convertidor.....	29
Figura 6. Convertidor DC/DC con bloques de Simulink	30
Figura 7. Curvas de carga CC/CV obtenidas	30
Figura 8. Topología del convertidor AC/DC	32
Figura 9. Diseño del control del convertidor.....	35
Figura 10. Modelo de convertidor AC/DC controlado.....	36
Figura 11 Código del controlador en modulación delta.....	36
Figura 12. Sistema radial de distribución	38
Figura 13. Sistemas en anillo (A) y malla (B)	38
Figura 14. Modelo completo de estación de recarga.	43
Figura 15. Red de distribución de 33 barras	44
Figura 16. Sistema de 13 barras IEEE.....	46
Figura 17. Sistema de 11 barras caso de estudio.....	47
Figura 18. Sistema radial de 3 barras	50
Figura 19. Sistema radial de 4 barras	52
Figura 20. Estaciones de carga en sistema de 33 barras	70
Figura 21. Barras disponibles para conectar la estación de carga.....	72

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Cuadro 1. Niveles de carga.....	18
Cuadro 2. Valores extraídos de la curva de descarga	20
Cuadro 3. Niveles de media tensión en Colombia	37
Cuadro 4. Modelamiento de cargas	40
Cuadro 5. Valores de entrada de la estación de carga	43
Cuadro 6. Configuración del sistema de 3 barras	56
Cuadro 7. Comparativa de valores de tensión en sistema 33 barras.....	64
Cuadro 8. Comparativa de corrientes ramales sistema de 33 barras	66
Cuadro 9. Resultados del flujo de potencia por el método B/F.	67
Cuadro 10. Resultados flujo de potencia del sistema de 11 barras	68
Cuadro 11. Resumen de casos de estudio para sistema de 33 barras.....	71
Cuadro 12. Resumen de los casos de estudio del sistema de 11 barras	73
Cuadro 13. Resultados de tensión caso de estudio 1	75
Cuadro 14. Resultados de corriente ramal del caso de estudio 1	76
Cuadro 15. Resultados tensiones de barras caso de estudio 2	77
Cuadro 16. Resultados corrientes ramales caso de estudio 2	78
Cuadro 17. Resultados de tensión en las barras caso de estudio 3	80
Cuadro 18. Resultados de corriente ramal caso de estudio 3.....	81
Cuadro 19. Resultados de tensiones nodales en el caso de estudio 4.....	82
Cuadro 20. Resultados de corrientes nodales en el caso de estudio 4	83
Cuadro 21. Resultados de corrientes ramales en el caso de estudio 4	84
Cuadro 22. Resultados de tensiones nodales en el caso de estudio 5.....	85
Cuadro 23. Resultados de corrientes nodales en el caso de estudio 5	86
Cuadro 24. Resultados de corrientes ramales en el caso de estudio 5	87

Cuadro 25. Resultados THDv de las barras en el SDEE de 33 barras a partir de los casos de estudio.....	92
Cuadro 26. Resultados THDi en las ramas del SDEE de 33 barras a partir de los casos de estudio	94
Cuadro 27. Resultados THDi individual en las ramas del SDEE de 33 barras a partir de los casos de estudio	95
Cuadro 28. Resultados THDi individual en las ramas del SDEE de 33 barras a partir de los casos de estudio	96
Cuadro 29. Resultados THDv individual por nodo en el SDEE de 33 barras a partir de los casos de estudios.....	98
Cuadro 30. Resultados THDv individual por nodo en el SDEE de 33 barras a partir de los casos de estudio	99
Cuadro 31. Resultados THD de las barras en el SDEE de 11 barras a partir de los casos de estudio.....	100
Cuadro 32. Resultados THDi de las ramas en el SDEE de 11 barras a partir de los casos de estudio.....	101
Cuadro 33. Resultados THDi individual en los nodos del SDEE de 11 barras a partir de los casos de estudio	102
Cuadro 34. Resultados THDi individual por ramas en el SDEE de 11 barras a partir de los casos de estudio	103
Cuadro 35. Valores máximos de distorsión armónica de tensión individual por nodo.....	104
Cuadro 36. Valores máximos de distorsión armónica total de tensión.....	105
Cuadro 37. Valores máximos de distorsión armónica individual por rama	105
Cuadro 38. Valores máximos de distorsión armónica individual por rama 11 barras.....	105

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Algoritmo para el desarrollo del estudio	114
Anexo B. Parámetros del sistema de 33 barras	115
Anexo C. Parámetros del sistema de 11 barras.....	118
Anexo D. Resultados de la simulación de la estación.....	120

NOMENCLATURA

SIGLAS

AC	: Corriente alterna
AC/DC	: Corriente alterna a corriente continua
BCBV	: Matriz corriente de barra a tensión de barra
BIBC	: Matriz de corrientes nodales a corrientes ramales
BT	: Baja tensión
CHAdEMO	: Protocolo de recarga de baterías CHarge de Move
DC	: Corriente continua
DC/DC	: Corriente continua a corriente continua
DLF	: Matriz de distribución de flujo de carga.
IEC	: Comisión electrotécnica internacional
IEEE	: Instituto de ingeniería eléctrica y electrónica
IGBT	: Transistor bipolar de puerta aislada
MT	: Media tensión
PI	: Control proporcional integral
PWM	: Modulación por ancho de pulso
RAF	: Factor de atenuación de la ondulación
SAE	: Sociedad de ingenieros de automoción
SDEE	: Sistema de distribución de energía eléctrica
SOC	: Estado de carga
THD	: Distorsión armónica total
VE	: Vehículo eléctrico

VARIABLES

C_f	: Capacitancia del filtro LCL en paralelo
f_{grid}	: Frecuencia de la red
K_{load}	: Factor de sobrecarga para cubrir transitorios
L_{grid}	: Inductancia del filtro LCL conectada a la red
L_{inv}	: Inductancia del filtro LCL conectada al inversor
PEV	: Potencia por vehículo eléctrico
R_d	: Resistencia del filtro LCL conectada en paralelo
S_{rated}	: Potencia de dimensionamiento de la estación
V_{grid}	: Tensión de la red
ω_{res}	: Frecuencia de resonancia

RESUMEN

TITULO: MÉTODO PARA EL ANÁLISIS DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN QUE ALIMENTAN ESTACIONES DE RECARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS*

AUTORES: Brayan Alberto García Vargas y Daniel Alberto Amado Pinzón**

PALABRAS CLAVE: Red de distribución, estación de recarga, vehículo eléctrico, distorsión

DESCRIPCIÓN:

En este documento se plantea un procedimiento para determinar la distorsión armónica en una red de distribución mediante una simulación a partir de un caso de estudio. Para el diseño del caso de estudio se realizaron investigaciones sobre las características de los elementos que lo componen, empezando por los modelos de redes de distribución obtenidos de los propuestos por el IEEE, ajustando los elementos de los sistemas para realizar un análisis mediante flujo de potencia armónica en el software MATLAB. El modelo de estación de carga propuesto posee un convertidor AC/DC y un convertidor DC/DC, el convertidor AC/DC consta de un filtro LCL cuya función es mitigar la distorsión y un grupo de IGBT encargado de suministrar energía al convertidor DC/DC, el convertidor DC/DC suministra la energía mediante un control de carga CCCV iniciando con corriente constante y finalizando con tensión constante, finalmente, el modelo de batería escogido posee curvas de descarga muy similares a las encontradas en una batería de ion-litio.

Con los elementos que componen el estudio definidos se realizó un análisis incorporando estaciones con diferentes niveles de penetración y con el modelo de estación a diferentes niveles de carga analizando el comportamiento de la distorsión para posteriormente plantear el procedimiento.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga. Codirectora: María Alejandra Mantilla Villalobos

ABSTACT

TITLE: METHOD FOR HARMONIC DISTORTION ANALYSIS IN DISTRIBUTION NETWORKS THAT FEEDS ELECTRIC VEHICLES CHARGING STATIONS*

AUTHORS: Brayan Alberto Garcia Vargas y Daniel Alberto Amado Pinzón**

KEYWORDS: Distribution Network, Charging Station, Electric Vehicle, Distortion

DESCRIPTION

In this document is proposed a process to determine the harmonic distortion in a distribution network, through case study simulation. To design the case study, investigations were made about the characteristics of the elements that composes it, starting with the distribution networks models obtained in IEEE's distribution test feeders, adjusting the system elements to make an analysis by harmonic power flow in MATLAB. The proposed charging station model has an AC/DC and DC/DC converter, the AC/DC converter consists in a LCL filter to mitigate the harmonic distortion and an IGBT group that supplies energy to the DC/DC converter, DC/DC converter supplies energy through a charging control CCCV starting with constant current and ending with constant voltage, finally the chosen battery model has discharge curves similar to those found in a lithium ion battery.

Defining the elements that composes the case study, an analysis was made incorporating charging stations with different penetration levels and different charge levels, watching the harmonic distortion behavior, followed by the proposing of the process.

* Degree project

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga. Codirector: María Alejandra Mantilla Villalobos

INTRODUCCIÓN

Al ser el parque automotriz convencional insostenible para el medio ambiente debido a los altos niveles de emisión de gases de efecto invernadero¹ y teniendo en cuenta que esta polución afecta de manera muy negativa la salud en las personas, se reconoce que es necesario un cambio en la movilidad. Como primera opción se proponen vehículos eléctricos que dispongan de un sistema de almacenamiento de energía recargable, como baterías, u otros dispositivos portátiles²

En Colombia, mediante la ley 1964 del 11 de julio de 2019 se pretende establecer las bases para el desarrollo de la infraestructura de las estaciones de recarga de vehículos eléctricos, al ser Bucaramanga un municipio de categoría especial³ posee un tiempo límite de tres (3) años a partir del día en que fue aprobado el estatuto para garantizar que existan en su territorio, como mínimo 5 estaciones de carga rápida en condiciones funcionales⁴. Estas estaciones poseen características de circuito convertidor el cual tiene la capacidad de cambiar la naturaleza de una señal de alterna a continua o viceversa, además de aumentar o reducir las señales que alimentan los VE con el fin de proporcionar la carga adecuada, produciendo distorsiones que afecten la calidad de la energía de la red de distribución de la que forman parte, distorsionando las señales de tensión y corriente en estas^{5 6}.

¹ IDEAM, «Inventario Nacional y Departamental de Gases de Efecto Invernadero-Colombia,» 2014.

² COLOMBIA CONGRESO DE LA REPUBLICA, *Ley No. 1964 del 11 de julio 2019, por medio de la cual se promueve el uso de vehículos eléctricos en Colombia*, 2019.

³ ALCALDIA DE BUCARAMANGA, *Decreto No. 0138 del 2018, por el cual clasifica al municipio de Bucaramanga como categoría espacial, para la vigencia 2019*, Bucaramanga, 2018.

⁴ ANIL Lalitha, TRUPATHI Abha, NAGESH Suresh, NIKITHA L Effect od Electrical Vehicle Chargin on Power Quality,» de *International Conference on circuits Power and Computing Technologies [ICCPCT]*, 2017

⁵ *Ibíd.*

⁶ ROY SUIJIT, Kumar KARMALER Ashish, AHMED Raju. Analysis of the Impact of Electric Vehicle Charging Station on Power Quality Issues,» de *International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE)*, 2019.

Considerando que la cantidad de estaciones de recarga de vehículos eléctricos conectadas a los sistemas de distribución aumentará progresivamente en los próximos años, es de vital importancia desarrollar herramientas que provean una visión clara del impacto generado por estas nuevas cargas, de tal forma que se puedan planear diseños adecuados, seguros para su conexión, prevenir fallas que afecten la infraestructura de la red de distribución y a los usuarios conectados a la misma.

Teniendo en cuenta lo mencionado, se propone a través de este documento realizar un procedimiento que permita determinar adecuadamente los niveles de distorsión presentes en los sistemas que contienen estaciones de recarga de vehículos eléctricos conectados a redes de distribución, identificando los requerimientos necesarios para simular y evaluar un caso de estudio con diferentes niveles de penetración, para así enumerar una serie de pasos a seguir que conforman el procedimiento completo.

Este documento se encuentra organizado de la siguiente manera: En el primer capítulo se identifican y definen los elementos que componen el estudio, en el segundo capítulo se plantean los modelos de estación y sistema de distribución junto con los casos de estudio y en el último capítulo se entregan los resultados obtenidos, analizando los comportamientos de las redes en estos casos y planteando un procedimiento que puede ser aplicado para realizar estudios mediante simulación de redes con estaciones de carga conectadas.

1. REQUERIMIENTOS PARA LA SIMULACIÓN ARMÓNICA DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN CON ESTACIONES DE RECARGA

Con el fin de analizar adecuadamente la distorsión armónica en redes de distribución causada por la interconexión de estaciones de recarga de VE, es esencial la siguiente información, la cual se puede encontrar en la literatura u otros estudios realizados.

- **Sobre la estación de recarga:** Recopilar información sobre los niveles de carga, modelamiento de la recarga, componentes de la estación y tipos de baterías. En la literatura se encontraron diversos modelos y topologías^{7 8 9}. A partir de esta revisión bibliográfica se realiza la selección de parámetros que se presentan en este documento.

Para el modelamiento de los componentes de la estación y la batería se seleccionó la herramienta SIMULINK del software Matlab, por ser la más empleada para observar comportamientos en estudios previos^{10 11}.

- **Sobre la red de distribución:** En la literatura se pueden encontrar diversos estudios realizados con modelos de prueba de redes de distribución planteados por el IEEE, los cuales ya contemplan parámetros de la red, número de barras y

⁷ YING YONG, Jia; MAHDI FAZELI, Seyed; RAMACHANDARAMURTHY, Vigna K.; MIAO TAN, Kang, «Design and development of a three-phase off-board electric vehicle charger prototype for power grid voltage regulation,» *ScienceDirect*, 2017

⁸ ARANCIBIA, Arnaldo; STRUNZ, Kai. Modeling of an Electric Vehicle Charging Station for Fast DC Charging,» *IEEE*, 2018.

⁹ YING YONG, Jia; RAMACHANDARAMURTHY, Vigna K.; MIAO TAN, Kang; MITHULANANTHAN, NBI-directional electric vehicle fast charging station with novel reactive power compensation for voltage regulation,» *ScienceDirect*, 2015.

¹⁰ ARANCIBIA, Arnaldo; STRUNZ, Kai. Op. Cit.

¹¹ FASUGBA, MCDAVIS A.; KREIN, Philip T. Gaining vehicle-to-grid benefits with unidirectional electric and plug-in hybrid vehicle chargers,» *IEEE*, 2011

nivel de tensión¹². Junto con esta información se encontró la ubicación de estaciones y el modelamiento de las cargas mostradas en artículos, trabajos de titulación y textos de estudio^{13 14}.

El detalle de la información que se debe conocer tanto de las estaciones de recarga como de la red de distribución se muestra a lo largo del presente capítulo.

1.1 MODALIDADES DE CARGA

La mayoría de las cargas para EV pueden realizarse en la casa durante la noche, donde se puede conectar a un tomacorriente para carga de nivel 1. Este tipo de carga no necesita la instalación de un conector especial, pero el tiempo que toma en llenar la batería es bastante prolongado. El nivel 2 es el que puede ser más utilizado tanto en zonas residenciales y zonas públicas manejando una carga media. Para este nivel de carga es necesaria la instalación de una toma especial, que pueda proveer adecuadamente la energía necesaria para la recarga. Cabe resaltar que en las dos modalidades de carga anteriores los cargadores están incorporados en el vehículo. El nivel 3 de carga está destinado a aplicaciones comerciales y públicas, operando como una estación de servicio con soluciones trifásicas^{15, 16}, teniendo como características principales, que este tipo de cargadores no están incorporados en el vehículo y que su tiempo de carga es mucho más reducido que

¹² KERSTING, William H. Radial distribution test feeders,» de *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings*, 2001.

¹³ ARDILA PRADA, Brayan; OCHOA VILLABONA, Yeison Ubicación óptima de una estación de recarga pública para vehículos eléctricos en una red de distribución de energía eléctrica., Bucaramanga, 2018

¹⁴ TASK FORCE ON HARMONIC MODELING AND SIMULATION, IEEE Power Eng. Soc. T&D Committee*, «Impact of Aggregate Linear Load Modeling on,» *IEEE Transactions on power delivery*, vol. XVII, nº 2, 2003.

¹⁵ FASUGBA, McDAVIS A.; KREIN, Philip T.

¹⁶ YILMAZ, Murat; KREIN, Philip T. Review of Battery Charger Topologies, Charging,» *IEEE*, 2013.

en las dos modalidades anteriores, haciéndolo ideal para recorrer largos trayectos sin tener que esperar demasiado tiempo por una carga completa.

Según lo mencionado, los VE pueden obtener la energía necesaria para trabajar con cualquiera de las modalidades de carga según lo requiera el usuario, pero, teniendo en cuenta el propósito de este documento, cuyos cargadores deben estar conectados a redes de media tensión y poseer tiempos de carga reducidos, la modalidad de carga a emplear será de nivel 3.

Este nivel de carga le puede entregar a los vehículos entre 208 a 600 V (AC o DC), son generalmente trifásicos y fuera de borda, su uso es principalmente comercial (Electrolinera o Estaciones de Servicios) debido a su alto nivel de potencia entre 50 a 100kW, esto es lo que proporciona más velocidad en la carga¹⁷.

Cuadro 1. Niveles de carga

Nivel de Carga	Tipo de cargador	Potencia del cargador	Tiempo de carga
Nivel 1 120 <i>Vac</i> (US) 230 <i>Vac</i> (EU)	On-board monofásico	1.4 <i>kW</i> 1.9 <i>kW</i>	4 -11 <i>horas</i> 11-36 <i>horas</i>
Nivel 2 240 <i>Vac</i> (US) 400 <i>Vac</i> (EU)	On- board Monofásico o trifásico	4 <i>kW</i> 8 <i>kW</i> 19.2 <i>kW</i>	1 – 4 <i>horas</i> 2 – 6 <i>horas</i> 2 - 3 <i>horas</i>
Nivel 3 208-600 <i>Vac</i> o <i>Vdc</i>	Off-board trifásico	50 <i>kW</i> 100 <i>kW</i>	0.4-1 <i>horas</i> 0.2-0.5 <i>horas</i>

¹⁷ Ibíd.

1.2 BATERÍAS

Un modelo de batería habitual es el de una fuente de voltaje ideal conectada en serie con una resistencia interna, sin embargo, este modelo no es adecuado en el momento de realizar estudios de carga de vehículos eléctricos, debido a que no puede mostrar el estado de carga (*SOC*) durante el proceso, por lo tanto, es necesario buscar un método que aporte más exactitud al estudio.

Se empleará una ecuación para describir el comportamiento electroquímico de una batería en términos de *SOC*, voltaje en terminales, voltaje en circuito abierto, resistencia interna y corriente de descarga. Los parámetros se deducen del comportamiento de descarga, teniendo en cuenta que se presentan estos mismos comportamientos durante la carga. Este modelo de batería se comparó con la hoja de datos de la batería real y fue validada para tener una alta precisión del 90%.¹⁸
¹⁹.

La ecuación de carga de la batería de Ion-Litio es la siguiente.

$$V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{it - 0.1Q} i^* - K \frac{Q}{Q - it} it + Ae^{-B \cdot it}$$

Ecuación 1. Carga de la batería de ion-Litio

Donde V_{batt} es el voltaje de la batería (V); E_0 es el voltaje constante de la batería (V); R es la resistencia interna (Ω); i es la corriente de la batería (Ah); K es la constante de polarización (Ω); Q es la capacidad de la batería (Ah); it es la carga real de la batería (Ah); i^* es la corriente filtrada (Ah); A es la amplitud exponencial de zona (V) y B es la constante de tiempo de zona exponencial inversa (Ah)⁻¹.

¹⁸ Ying Yong, J.; Ramachandaramurthy, V. K.; Miao Tan, K. & Mithulananthan N. Op. Cit.

¹⁹ TREMBLAY, Olivier; DESSAINT, Louis-A Gaining vehicle-to-grid benefits with unidirectional electric and plug-in hybrid vehicle chargers,» *IEEE*, 2011.

Sin embargo, basado en la Ecuación 1, una caída de voltaje evidente de la batería es notable cuando el estado de carga de la batería (*SOC*) alcanza el 90%. Por lo tanto, la ecuación. 1 se modifica y puede reescribirse como:

$$V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{it - Q} i^* - K \frac{Q}{Q - it} it + Ae^{-B \cdot it}$$

Ecuación 2. Carga de la batería ion-litio al 90%

El valor de los parámetros en la Ecuación 2 puede deducirse de la curva de descarga de la batería.

Cuadro 2. Valores extraídos de la curva de descarga

Parámetros	Batería de ion litio 360V, 6.2Ah
$V_{full}(V)$	403.2
$Q_{exp}(Ah)$	6
$V_{exp}(V)$	384
$Q_{nom}(V)$	58
$V_{nom}(V)$	345.6

Se necesitan tres conjuntos de datos importantes para calcular el valor de los parámetros en la ecuación 2, el conjunto de datos requerido son la tensión de carga completa (V_{full}), la capacidad y la tensión al final de la zona exponencial (Q_{exp} V_{exp}) y la capacidad y el voltaje al final de la zona nominal (Q_{nom} , V_{nom}). Basado en un modelo disponible de batería y su curva de descarga, estos datos se pueden encontrar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** El valor de los parámetros de la batería en la Ecuación 2 se puede determinar. Se supone que la resistencia interna R es constante y tiene un valor de 0.05 (Ω). Las ecuaciones para determinar el valor de A, B, E_0 y K con los datos de la tabla 2 son las siguientes ²⁰:

²⁰ Ibíd.

$$A = V_{full} - V_{exp} = 403.2 - 384 = 19.2$$

Ecuación 3.

$$B = \frac{3}{Q_{exp}} = \frac{3}{6} = 0.5(Ah)^{-1}$$

Ecuación 4.

$$E_0 = V_{full} - A + R \cdot i = 403.2 - 19.2 + 0.05(66.2) = 387.31 V$$

Ecuación 5.

$$K = \left(E_0 - V_{nom} - R \cdot i + Ae^{\frac{-3}{Q_{exp}}Q_{nom}} \right) \frac{(Q - Q_{nom})}{Q(Q_{nom} + i)}$$

$$K = \left(387.31 - 345.6 - 0.05 * 66.2 + 19.2e^{\frac{-3*58}{6}} \right) * \left(\frac{(66.2 - 58)}{66.2(66.2 + 58)} \right) = 0.0383$$

Ecuación 6.

La ecuación *SOC* se basa en el método de recuento de culombios ²¹. Este método es fácil de implementar, pero se debe conocer el valor inicial de *SOC*. La ecuación se da de la siguiente manera:

$$SOC = 100 \left(1 - \frac{it}{Q} \right)$$

Ecuación 7.

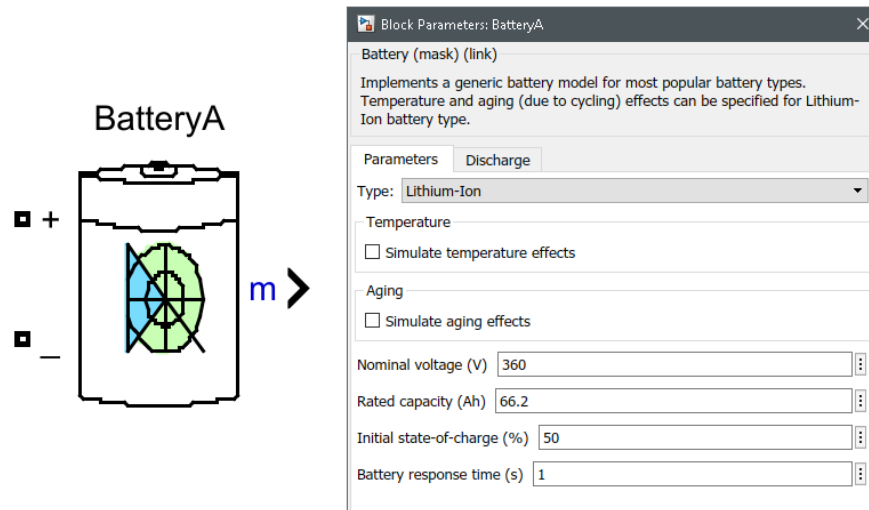
1.2.1. Modelado en simulink. Para este documento se emplearán los valores correspondientes a la batería de Ion-Litio con voltaje nominal de 360 V y capacidad nominal de 66.2 Ah de la tabla 2, debido a que es estos valores han sido

²¹ RAHIMI-EICHI, Habiballah; CHOW, Mo-Yuen Radial distribution test feeders,» de *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings*, 2001

comprobados previamente en otros documentos ²² ²³ y de este modo se pueden observar más fácilmente los comportamientos de descarga detallados con anterioridad.

Para la obtención adecuada de resultados en el proceso de simulación se empleará el bloque de SIMULINK Battery de la librería Simscape, teniendo en cuenta que la teoría del modelado de las ecuaciones visto previamente es el mismo en este elemento, no se tendrán en cuenta los efectos de la temperatura y el envejecimiento en el modelo para facilitar y disminuir el tiempo que tarda en completar la simulación.

Figura 1. Bloque de batería Simulink



Para asegurar que el modelo en SIMULINK es el correcto, es posible graficar el comportamiento de la descarga de la batería ingresando los valores nominales de esta en los campos correspondientes de la configuración de los parámetros del bloque "Battery" y oprimiendo el botón Plot de la pestaña Discharge, el resultado de este proceso genera unas curvas con comportamiento muy similar a las vistas en

²² FASUGBA M. A. y KREIN P. T. Op. Cit.

²³ KERSTING, W. H. Op. Cit.

los documentos de referencia ²⁴ ²⁵. Con los resultados mostrados en la figura 3, se considera adecuado el modelo de batería seleccionado.

Figura 2. Parámetros de descarga de la batería

Parameters Discharge

Determined from the nominal parameters of the battery

Maximum capacity (Ah) 66.2

Cut-off Voltage (V) 270

Fully charged voltage (V) 419.0354

Nominal discharge current (A) 28.7826

Internal resistance (Ohms) 0.054381

Capacity (Ah) at nominal voltage 59.8678

Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)] [388.9389 3.252435]

Display characteristics

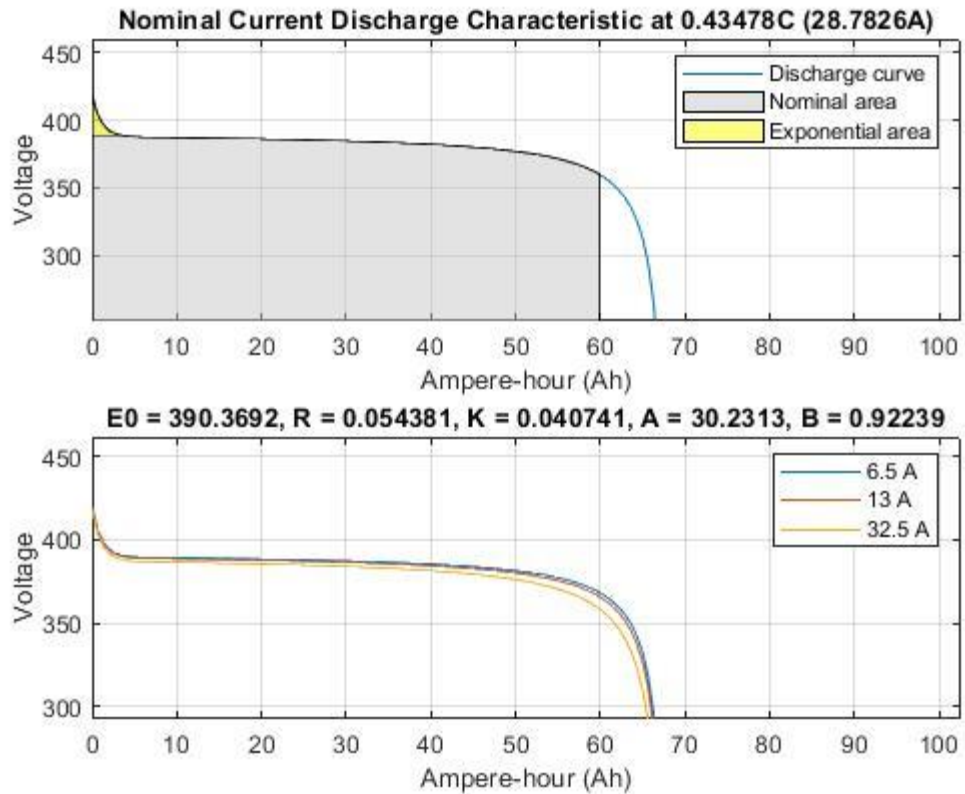
Discharge current [i1, i2, i3,...] (A) [6.5 13 32.5]

Units Ampere-hour Plot

²⁴ YING YONG, Jia; RAMACHANDARAMURTHY, Vigna K.; MIAO TAN, Kang; MITHULANANTHAN, N

²⁵ TREMBLAY, Olivier; DESSAINT, Louis-A

Figura 3. Parámetros de descarga de la batería



1.3 ESTACIONES DE RECARGA

Una estación de recarga es un espacio dispuesto especialmente para proveer energía eléctrica a las baterías de los VE, incluyendo también a los vehículos híbridos enchufables.

Estas estaciones de recarga son parte fundamental en el desarrollo de los vehículos eléctricos debido a que el tipo de estación empleada, su nivel de potencia, si es unidireccional o bidireccional o si emplea un cargador externo (Off-board) o uno a bordo del vehículo (On-board), influirá directamente en el tiempo que tome abastecer completamente de energía las baterías disponibles en los VE y también

en el tiempo que le tome a estas descargarse, teniendo en cuenta lo anterior, es preciso afirmar que el cargador de batería disponible en la estación debe ser eficiente, confiable, con una alta densidad de potencia, bajo costo y bajo volumen y peso para obtener un desempeño óptimo durante la conducción del vehículo eléctrico que se está empleando.

La carga unidireccional es un primer paso lógico porque limita los requisitos de hardware, simplifica los problemas de interconexión y tiende a reducir la degradación de la batería. Un sistema bidireccional permite inyectar energía desde la batería a la red y la estabilización adecuada de la potencia del sistema²⁶.

El enfoque de carga externo (off-board) es aplicable a la mayoría de los VE, donde se puede conectar la red eléctrica a través de las unidades de carga (Estaciones). Para recibir la recepción fueron establecidos varios estándares por la sociedad de ingenieros SAE, la IEC y CHAdeMO. Estas normas rigen los requisitos del cargador, los métodos de interconexión y las tasas de carga segura.²⁷

Para el estudio correspondiente a este documento se propone un modelo de cargador externo (off board) unidireccional, este se compone de dos partes principales, un convertidor que será el encargado de cargar la batería (DC//DC) y un convertidor que será el encargado de obtener la energía de la red y proporcionar el voltaje DC adecuado (AC/DC), teniendo en cuenta que los cargadores que no están incorporados a los VE son los que obtienen la energía eléctrica para el proceso de carga de las redes de media tensión y que los cargadores unidireccionales generan más impacto en los sistemas de potencia, ya que estos no permiten regular tensiones para poder incorporar un número mayor de vehículos²⁸, por lo tanto, se intuye que de esta manera será más sencillo visualizar los

²⁶ FASUGBA, MCDAVIS A.; KREIN, PHILIP T. Op. Cit.

²⁷ *Ibíd.*

²⁸ *Ibíd.*

armónicos que se puedan presentar en la simulación del sistema de potencia con los datos obtenidos.

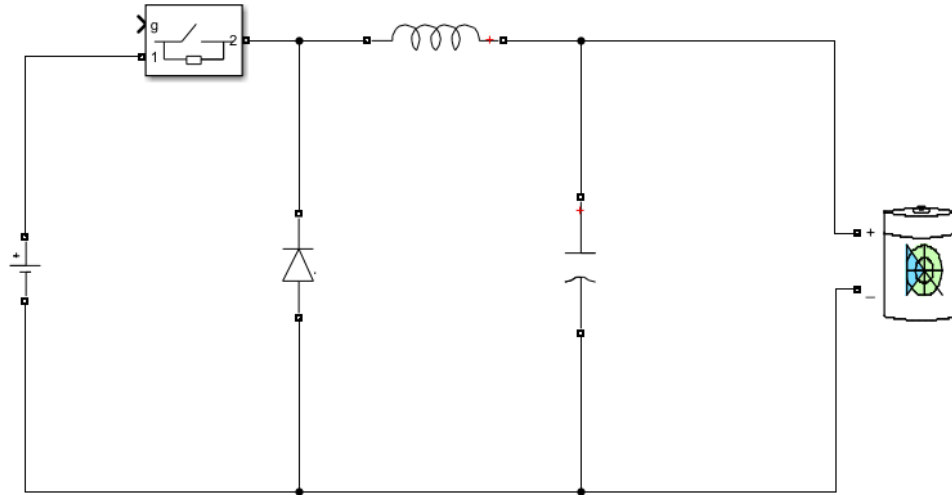
1.3.1 Convertidor DC/DC. La función de los convertidores DC/DC que se emplean en la carga de vehículos eléctricos, consiste en recibir la energía en DC de un convertidor AC/DC a una tensión mayor a la requerida por la batería del EV y reducirla a un nivel adecuado para el proceso de carga.

El modelo de convertidor DC/DC para el desarrollo de la simulación se basa en la conexión de un filtro de paso bajo que entrega las señales requeridas a través de un control complementario, estas señales de control se encargarán de proveerle a la batería corriente constante hasta un nivel del carga definido previamente y posteriormente una tensión constante para finalizar la carga total.

1.3.2. Topología del convertidor DC/DC. La topología del convertidor DC/DC consta de una tensión de entrada DC proveniente de un convertidor AC/DC que será conectada a un interruptor, teniendo en cuenta que la carga de la batería requiere señales continuas, es necesario conectar un filtro de paso bajo con una bobina y un condensador (L-C) añadido al convertidor básico. Cuando el interruptor está abierto, el diodo le proporciona un camino a la corriente almacenada en la bobina y cuando se encuentra cerrado, dicho diodo se polariza inversamente, proporcionando de esta manera una tensión reducida a la salida del circuito como se muestra en la figura 4²⁹.

²⁹ HART D. W., «El convertidor reductor,» de *Electrónica de potencia*, 2001

Figura 4. Topología de un convertidor DC/DC para carga de baterías de VE



Los valores de capacitancia e inductancia son hallados conociendo previamente la tensión y corriente de carga nominal de la batería y la tensión de salida y entrada que va a manejar el convertidor, con estos datos se utilizan las ecuaciones dadas por la teoría para hallar los parámetros que aporten exactitud al modelo.

Para hallar la inductancia:

$$(\Delta i_L)_{open} = -\left(\frac{V_o}{L}\right)(1 - D)T$$

Ecuación 8.

$$(\Delta i_L)_{open} = \left(\frac{V_s - V_o}{L}\right)(DT)$$

Ecuación 9.

Donde D es conocida como el ciclo de trabajo del circuito y se halla con la tensión de entrada y de salida así:

$$D = \frac{V_o}{V_s}$$

Ecuación 10.

El periodo T está dado por la frecuencia de conmutación del circuito f_{sw} que se establece a un valor adecuado para que los valores de la capacitancia y la inductancia no sean elevados.

Para hallar la capacitancia:

$$\Delta V_o = \frac{T \Delta i_L}{8C}$$

Ecuación 11.

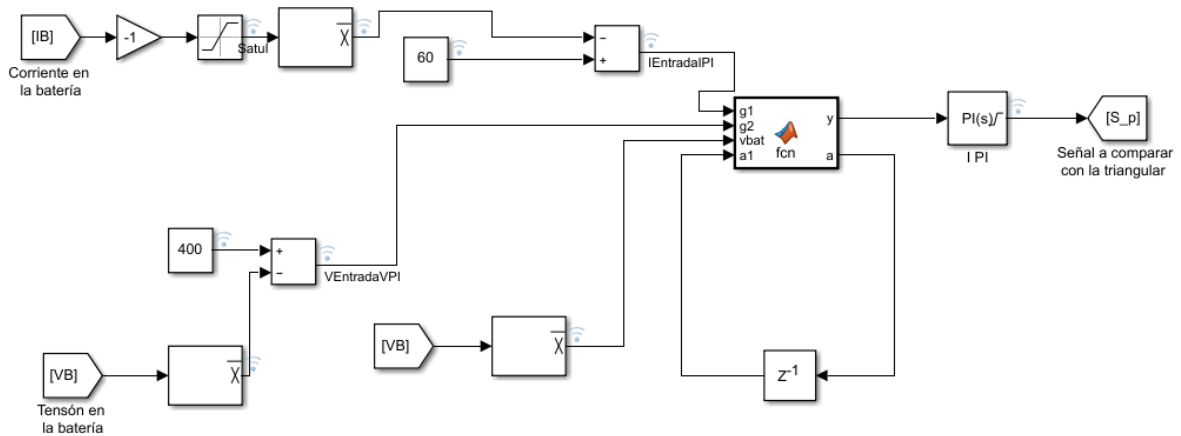
De este modo se obtienen los parámetros del circuito que funcionará como convertidor DC/DC, cuyos valores calculados específicamente para el caso de estudio de simulación tienen el propósito de proporcionar exactitud en las señales obtenidas durante el proceso de carga y por lo tanto una visión adecuada de la repercusión de las estaciones de carga en los sistemas de distribución.

1.3.3. Control del convertidor DC/DC. Es necesario para la carga de la batería del VE que la tensión y corriente entregada a esta sea una señal continua con algunas variaciones durante el proceso, por lo tanto, es indispensable diseñar un control que cumpla con los requisitos adecuados para el cargador. Para la simulación que se desea realizar, es necesario tener claridad sobre las características principales en tensión y corriente de las baterías empleadas comercialmente.

El control de esta carga inicia midiendo la señal de corriente en la batería, esta señal se compara con un valor de corriente establecido y se mide su error, si no ha alcanzado el *SOC* que cambia de corriente constante a tensión constante esta señal

continúa a un control PI que genera una señal PWM la cual se compara con una señal triangular, el resultado de esta comparación lo recibe el interruptor del circuito reductor para cerrar el lazo de control, si la batería ya ha cumplido el estado de carga, la corriente bajará a cero y se realizará el proceso anterior pero a tensión constante.

Figura 5. Diseño del control del convertidor



1.3.4. Modelado en simulink del convertidor DC/DC. Con el propósito de facilitar la simulación y debido a que el control durante la carga que se va a emplear es en un principio con corriente constante y posteriormente con tensión constante (CC/CV) se propone usar el bloque de simulink CCCV Battery Charger **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** de la librería Simscape, el cuál realiza de manera sencilla la carga de la batería al tener el control descrito previamente incorporado, basta con ingresar y conocer con anterioridad los límites de carga de la batería y la temperatura ambiente del lugar donde se pretende incorporar la estación en la realidad.

Al simular el conjunto de cargador y batería se obtienen las señales de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, cuyo comportamiento indica que el control de carga se está efectuando de manera adecuada.

Figura 6. Convertidor DC/DC con bloques de Simulink

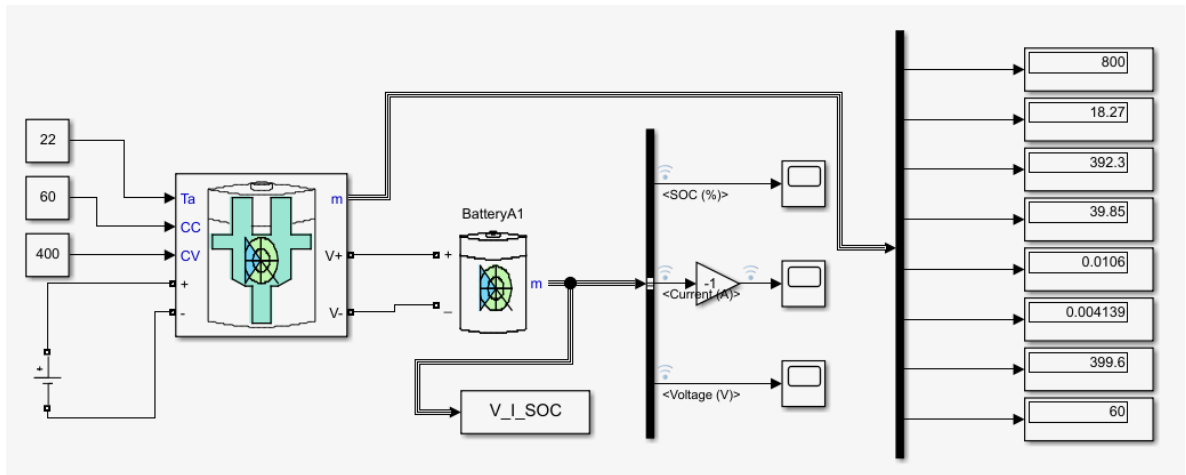
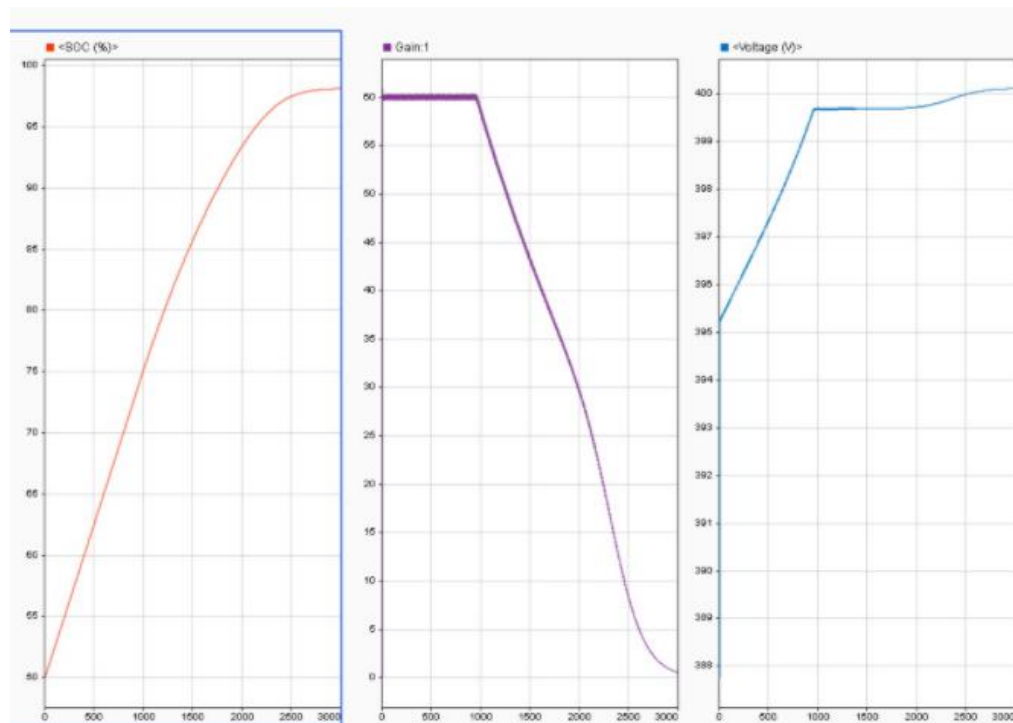


Figura 7. Curvas de carga CC/CV obtenidas



1.3.5. Convertidor AC/DC. Para la carga de VE, el convertidor AC/DC tiene como propósito suministrarle la energía necesaria en DC al convertidor DC/DC de la estación, trabajando ambas partes en conjunto para entregar a la batería la potencia

necesaria durante el tiempo de carga, este elemento permitirá la conversión de la energía obtenida de la red³⁰.

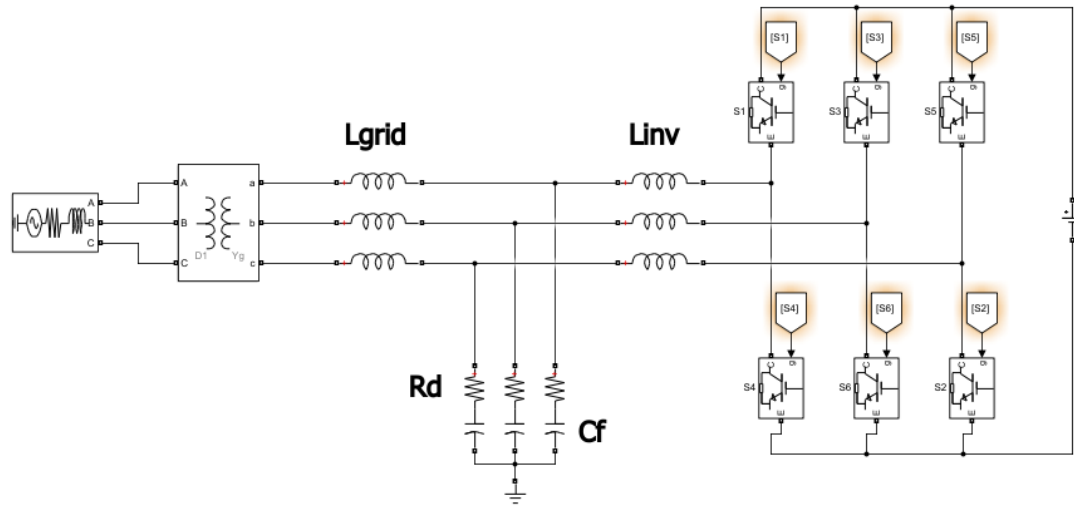
El modelo de convertidor AC/DC que se pretende implementar para el desarrollo de la simulación en este documento se basa en un inversor trifásico controlado trabajando en conjunto con un filtro LCL que contribuirá en la reducción de los armónicos causados durante la carga y un transformador delta-estrella que proporcionará una tensión trifásica de entrada adecuada ya que el inversor no puede recibirla directamente de la red y debe ser reducida para adecuarse a los parámetros de este, el lado delta del transformador funcionará como un filtro de armónicos múltiplos de 3 .

El control realizado en el inversor para este caso de estudio tiene el fin de entregar una magnitud exacta de tensión a la salida, siendo esto posible a través de un proceso que proporcionará señales adecuadas a los IGBT que son los encargados de realizar la conversión de energía.

1.3.6. Topología del convertidor AC/DC. La topología del convertidor AC/DC consta de una fuente trifásica de voltaje que simula una tensión de red de media a 13.2 kV, un transformador delta-estrella que se encargará de proveerle el voltaje adecuado a la entrada del inversor y de filtrar los armónicos múltiplos de 3, un filtro LCL que se compone de la inductancia de la red (L_{grid}), la capacitancia de la red (C_f) con una resistencia en serie (R_d) y la inductancia del lado del inversor (L_{inv}), además de un puente de IGBT que se encargará de generar la señal de continua a la salida del circuito como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

³⁰ YING YONG, Jia; MAHDI FAZELI, Seyed; RAMACHANDARAMURTHY, VIGNA K.; MIAO Tan, KANG Op. Cit.

Figura 8. Topología del convertidor AC/DC



Para el funcionamiento adecuado del modelo de convertidor, es necesario calcular los parámetros del filtro LCL como se muestra a continuación:

La selección de la inductancia del lado del inversor se calcula con la tensión en DC del circuito, el índice de modulación del inversor, la frecuencia de conmutación y la distorsión armónica total actual THD, la selección de capacitancia e inductancia del lado de la red depende de los parámetros de esta, la potencia aparente máxima, la frecuencia de resonancia y el factor de atenuación de la ondulación (RAF). Conociendo estos datos, se introducen en las siguientes ecuaciones.

$$L_{inv} = \frac{V_{grid}^2}{S_{rated} \cdot THD \cdot 2\pi f_{sw}} \sqrt{\frac{\pi^2}{18} \cdot \left(\frac{3}{2} - \frac{4\sqrt{3}}{\pi} m_a + \frac{9}{8} m_a^2 \right)}$$

Ecuación 12.

$$C_f \leq \frac{0.05 \cdot S_{rated}}{2\pi \cdot f_{grid} \cdot V_{grid}^2}$$

Ecuación 13.

$$L_{grid} = \frac{RAF + 1}{RAF \cdot C_f \cdot 2\pi \cdot f_{sw}^2}$$

Ecuación 14.

Donde f_{sw} es la frecuencia de conmutación, f_{grid} es la frecuencia de la red, m_a es el índice de modulación del inversor, además, comúnmente se toma el THD entre un 5% y un 30% , el RAF al 20% y S_{rated} está dada por la ecuación:

$$S_{rated} = \frac{K_{load} \cdot N_{slot} \cdot P_{ev}}{COS \phi}$$

Ecuación 15.

Donde K_{load} es un factor de sobrecarga para cubrir transitorios, N_{slot} son las ranuras de carga disponibles para VE, P_{ev} es la máxima tasa de potencia individual de un EV y $COS \phi$ es el factor de potencia, con esta ecuación es posible hallar la potencia según el número de vehículos que se desean conectar simultáneamente.

Después de obtener los parámetros del filtro es necesario verificar si la frecuencia de resonancia está en un rango entre un poco menos de la mitad de la frecuencia de conmutación y 10 veces más grande que la frecuencia de la red, la frecuencia de resonancia está dada por:

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_{inv} + L_{grid}}{L_{grid} \cdot L_{inv} \cdot C_f}}$$

Ecuación 16.

Si no se cumple esta condición es posible variar C_f , RAF y el THD para obtener una frecuencia de resonancia adecuada.

Finalmente, con esta frecuencia de resonancia se calcula la resistencia R_d en serie con el capacitor así:

$$R_d = \frac{1}{3 \cdot C_f \cdot \omega_{res}}$$

Ecuación 17.

De esta manera se obtienen los parámetros adecuados para el filtrado de los armónicos³¹, que influirá directamente en la calidad de las señales que se presenten en el sistema de distribución.

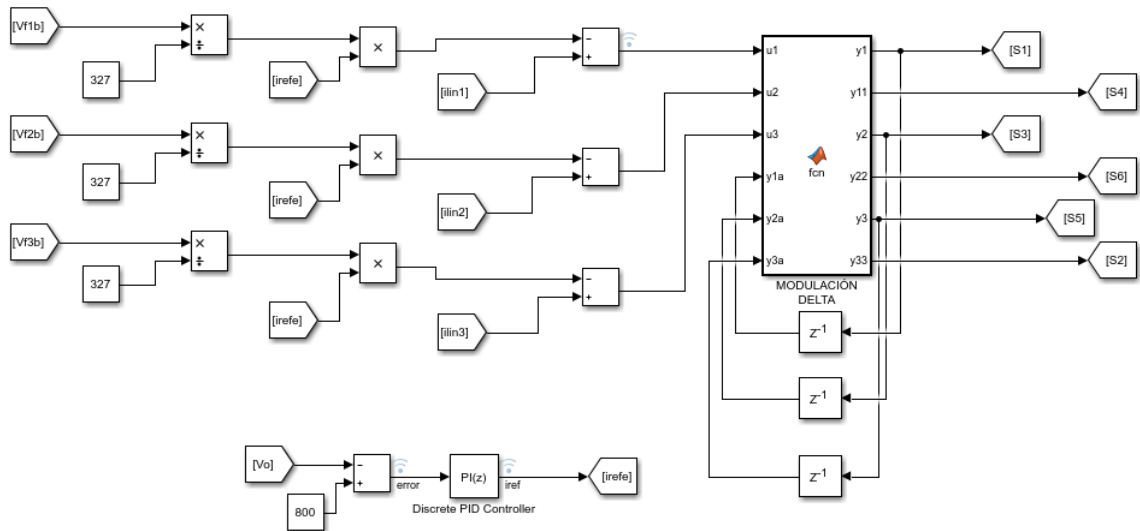
1.3.7. Control del convertidor AC/DC. Es necesario realizar un control en el modelado del inversor debido a que, si los IGBT que lo componen no tienen una referencia adecuada no será posible realizar la conmutación para obtener la señal de tensión requerida que estará conectada al convertidor DC/DC y completar la simulación adecuadamente.

El control de la señal de salida en DC del convertidor empezará por medir las señales de tensión de línea en el lado de baja del transformador y dividir las en el valor pico de la red, la señal resultante será multiplicada con una corriente de referencia obtenida mediante un control PI que compara la tensión de salida del convertidor y la magnitud deseada de voltaje, esta multiplicación será comparada con las corrientes de línea que alimentarán el convertidor para obtener una señal que ingresará a un controlador basado en un método conocido como modulación

³¹ ARANCIBIA, Arnaldo; STRUNZ, Kai

delta³², el cual trabaja con una banda de histéresis igual a cero y con una frecuencia de modulación constante, de esta manera se obtienen las señales de conmutación adecuada para los IGBT del convertidor **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 9. Diseño del control del convertidor



1.3.8. Modelado en simulink del convertidor ac/dc. Con el propósito de facilitar la simulación al igual que en el convertidor DC/DC se emplearán los elementos de circuitos disponibles en la librería Simscape como componentes de la topología de convertidor y filtro LCL junto con un bloque conocido como Matlab Function de la librería User-Definer Functions, encargado de realizar el control en modulación delta mediante un código incorporado, responsable de las señales de entrada de los IGBT.

³² PETIT, Johann Farith Control de Filtros Activos de Potencia para la Mitigación de Armónicos y Mejora del Factor de Potencia en Sistemas Desequilibrados, Madrid, 2007.

Figura 10. Modelo de convertidor AC/DC controlado

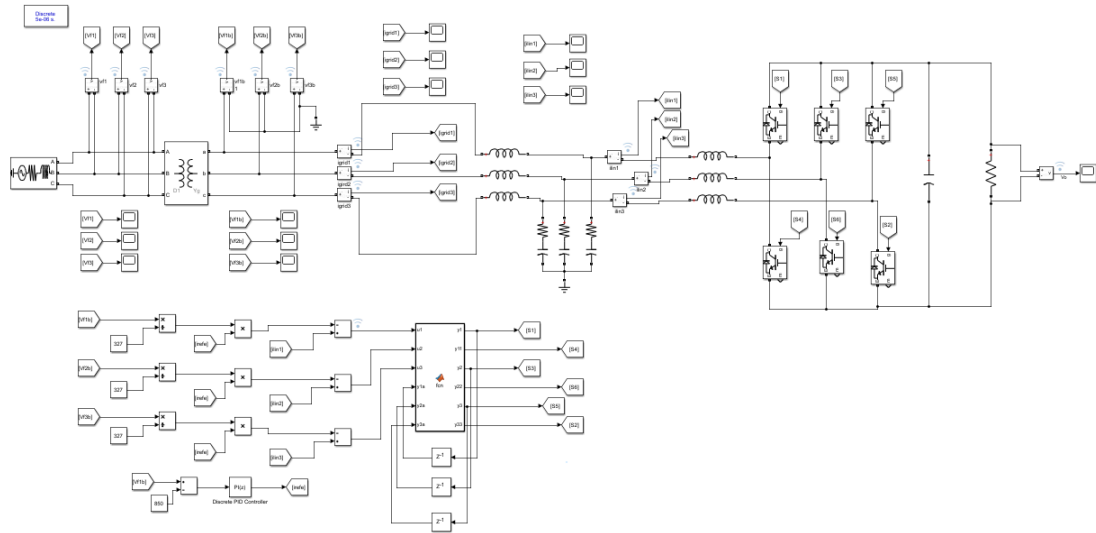


Figura 11 Código del controlador en modulación delta

```

Editor - Block: Estacion/MODULACIÓN DELTA
MODULACIÓNDELTA x +
1 function [y1, y11, y2, y22, y3, y33] = fcn(u1, u2, u3, y1a, y2a, y3a)
2
3     if u1>0
4         y1=1;
5     else
6         y1=0;
7     end
8
9     if u2>0
10        y2=1;
11    else
12        y2=0;
13    end
14
15
16    if u3>0
17        y3=1;
18    else
19        y3=0;
20    end
21    y11=1-y1;
22    y22=1-y2;
23    y33=1-y3;

```

1.4. NIVEL DE TENSIÓN

Las redes de distribución son un elemento en la cadena eléctrica que se encargan de suministrar la energía desde la subestación hasta los transformadores de distribución y diversas cargas conectadas, según la potencia requerida para la estación de carga rápida se establece que esta debe estar conectada únicamente a media tensión según *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..*

En Colombia la media tensión está contemplada como aquellos valores que sean mayores o iguales a 1 kV y menores a 57,5 kV. Según la NTC 1340, ésta se encuentra dividida en dos niveles para sistemas trifásicos.

Cuadro 3. Niveles de media tensión en Colombia

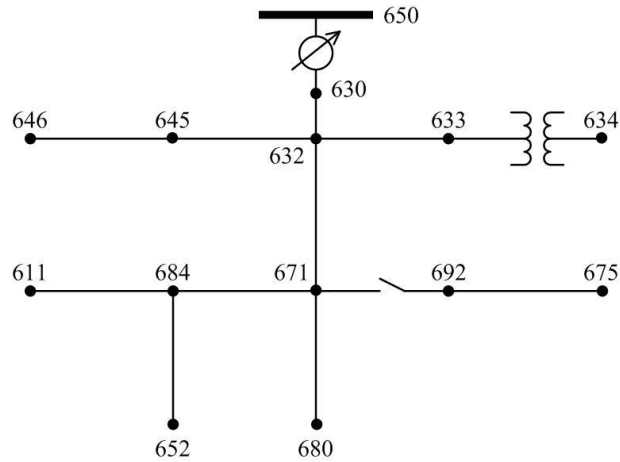
NIVEL	Tensión Nominal (V)
Nivel 2 $1 \text{ kV} \leq V_n < 30 \text{ kV}$	4160
	11400
	13200
	13800
Nivel 3 $30 \text{ kV} \leq V_n < 57,5 \text{ kV}$	34500
	44000

1.5. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Principalmente encontramos dos tipos de sistemas de distribución, según la ubicación y cantidad de alimentadores, estos son:

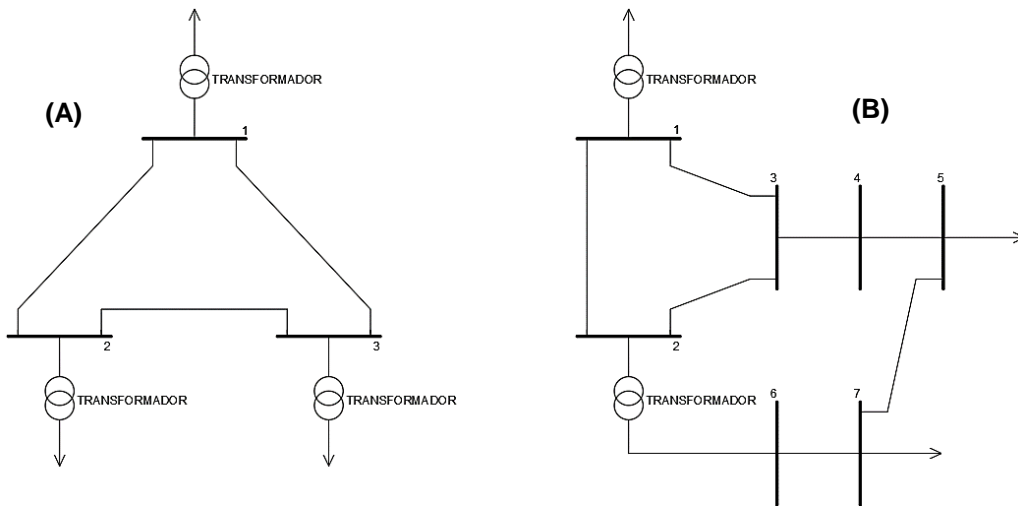
1.5.1. Radial. Es aquel que posee solo un alimentador y dirige la potencia hacia las cargas, es decir, un solo camino del alimentador a la carga.

Figura 12. Sistema radial de distribución



1.5.2. Anillo y Malla. Son aquellos que poseen más de un camino entre el alimentador a la carga para así garantizar la prestación del servicio ante una falla siendo un sistema más complejo.³³ En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (A) se puede ver un sistema en anillo donde el alimentador se representa con el punto negro. (B) Un sistema en malla.

Figura 13. Sistemas en anillo (A) y malla (B)



³³ JUÁREZ CERVANTES, José Dolores Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica, Universidad Autónoma Metropolitana, 1995.

1.6. MODELOS DE CARGAS PARA EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.

Carga se define como la potencia eléctrica requerida para el funcionamiento de uno o varios equipos eléctricos³⁴.

El modelamiento de una carga eléctrica es una representación matemática de la relación entre la potencia aparente, tensión y frecuencia de la red, en el caso de estudio, este es usado para realizar flujos de potencia mediante métodos iterativos, donde los voltajes iniciales pueden ser valores que se asumen y van cambiando a medida que las iteraciones avanzan, existiendo tanto para sistemas trifásicos, bifásicos y monofásicos³⁵. Los cuales son:

a. Modelo de carga de impedancia constante.

Es toda carga donde varía la potencia activa y reactiva en relación con el cuadrado de la tensión según su conexión.

b. Modelo de carga de corriente constante.

Es aquel donde la variación de potencia aparente está directamente relacionada con la variación de tensión.

c. Modelo de carga de potencia constante.

Como su nombre lo indica no presenta variaciones de potencia activa y reactiva según el nivel de tensión debido a que varía sus valores de corriente.

³⁴ ICONTEC, Código Eléctrico Colombiano NTC 2050, 1998

³⁵ KERSTING, William H. Distribution System Modeling and Analysis, Tercera ed., New Mexico: CRC Press., 2012.

Estos modelos mencionados en sistemas trifásicos varían dependiendo si la carga se conecta en estrella o en delta.

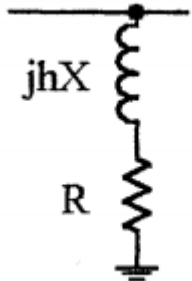
1.7 MODELAMIENTO DE LAS CARGAS PARA ANÁLISIS ARMÓNICO

Las cargas lineales son todas aquellas que al recibir entre sus terminales una tensión sinusoidal de frecuencia fundamental, produce una corriente sinusoidal de igual frecuencia³⁶.

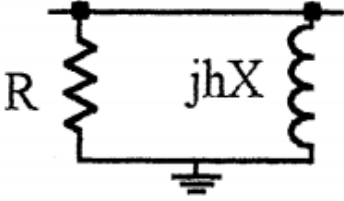
Al realizar los flujos de potencia armónica en una red de distribución es necesario modelar las cargas lineales y demás elementos para obtener resultados del comportamiento del sistema en presencia de componentes armónicas.

Los modelos para cargas R, RL o RLC según su conexión serie o paralelo son:

Cuadro 4. Modelamiento de cargas

CARGA SERIE	
Modelo	Ecuación
	$R = P * \frac{ V ^2}{P^2 + Q^2} ; \quad X = Q * \frac{ V ^2}{P^2 + Q^2}$

³⁶ TASK FORCE ON HARMONIC MODELING AND SIMULATION, IEEE POWER ENG. SOC. T&D COMMITTEE* Op. Cit.

CARGA EN PARALELO	
Modelo	Ecuación
	$R = \frac{ V ^2}{P} \quad ; \quad X = \frac{ V ^2}{Q}$

2. DISEÑO Y FORMULACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

Según la información obtenida sobre los elementos de la estación y los modelos de las redes de distribución, se propone empezar por el diseño del módulo de carga en simulación. Los datos obtenidos de este se incorporarán al modelo de la red variando el nivel de penetración y los niveles de carga de las estaciones con el fin de recopilar resultados que puedan ser analizados.

2.1 DISEÑO DEL MODELO DE ESTACIÓN

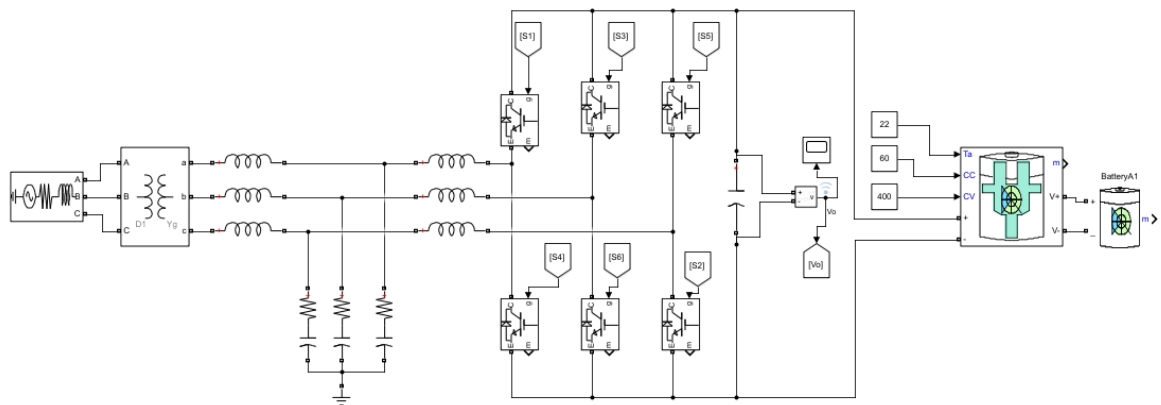
El modelo de estación de carga de VE corresponde a un cargador off-board de nivel 3 a 50 kW de potencia para obtener la carga rápida según la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**, además, las características de la batería son las expuestas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**, propias de una ion-litio a 360 V y 66,2 Ah, con estas especificaciones y las curvas de descarga de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**, las cuales muestran comportamientos propios de este elemento ^{37 38}, evidenciando ser los adecuados. El siguiente paso es definir el modelo de convertidor que surtirá la energía. La carga para el modelo de batería particularmente se realiza a 400 V, el convertidor DC/DC que proveerá energía corresponde al mostrado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** ya que permite limitar los parámetros de carga a 400 V y 60 Ah evitando anomalías durante el proceso, además es posible realizar adecuadamente una carga con corriente constante al inicio y posteriormente con tensión constante para finalizar el proceso como se muestra en la **¡Error! No**

³⁷ YING YONG, Jia; RAMACHANDARAMURTHY, Vigna K.; MIAO TAN, Kang; MITHULANANTHAN, N. Op. Cit.

³⁸ TREMBLAY, Olivier; DESSAINT, Louis-A

se encuentra el origen de la referencia.. El convertidor AC/DC encargado de entregar la energía al circuito reductor será surtido a través de la red de media tensión mediante un transformador delta-estrella de 13.2 kV a 400 V, al lado de baja se conectará un filtro LCL con inductancia de red L_{grid} a 1.5 mH, capacitancia C_f de 74 μ F, resistencia R_d a 1.103 Ω , inductancia del inversor L_{inv} a 1.8 mH, los cuales son valores calculados para aprovechar de manera eficiente la absorción de los armónicos generados y mitigar impactos en la red Cuadro 5 Además, este modelo también consta de un capacitor a la salida para atenuar el rizado de la señal con un valor de 7 mF Figura 14.

Figura 14. Modelo completo de estación de recarga.



Cuadro 5. Valores de entrada de la estación de carga

Parámetros	Valores
Δ -Y	13.2 / 400
L_{grid}	0.256 mH
L_{inv}	0.739 mH
C_f	74.604 μ F
R_d	0.5321 Ω
C_o	7 mF
Temperatura ambiente del cargador	22°
Voltaje constante del cargador	400 V

Corriente constante del cargador	60 A
Voltaje nominal de la batería	360 V
Corriente nominal de la batería	66.2 Ah

2.2. SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA (SDEE)

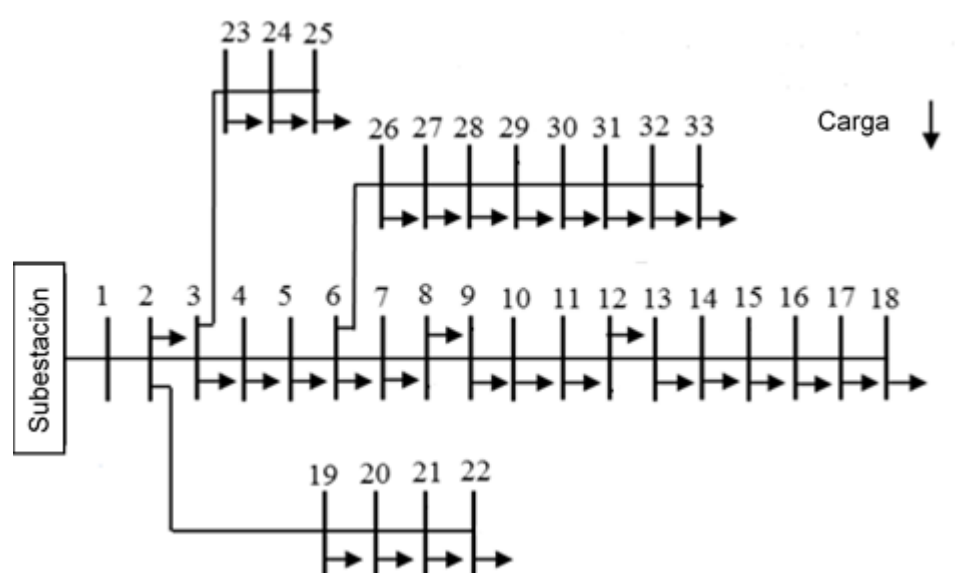
Para realizar los respectivos flujos de potencia con los valores de obtenidos por la simulación de la estación de carga utilizaremos dos modelos de redes radiales.

- a. Modelo de 33 barras.
- b. Modelo de 11 barras.

2.2.1. Modelo de 33 barras. Es un sistema de distribución radial balanceado el cual es usado para hacer estudios de generación distribuida y análisis de componentes armónicos.

Se representa mediante su diagrama unifilar.

Figura 15. Red de distribución de 33 barras



Este modelo cuenta con los datos de las impedancias y admitancias por línea, donde a partir de estos datos hallamos los valores en por unidad (p.u) tomando como bases $V_{base} = 13,2 \text{ kV}$ y $S_{base} = 10 \text{ MVA}$, como lo muestra Tabla A. 1 en el Anexo B.

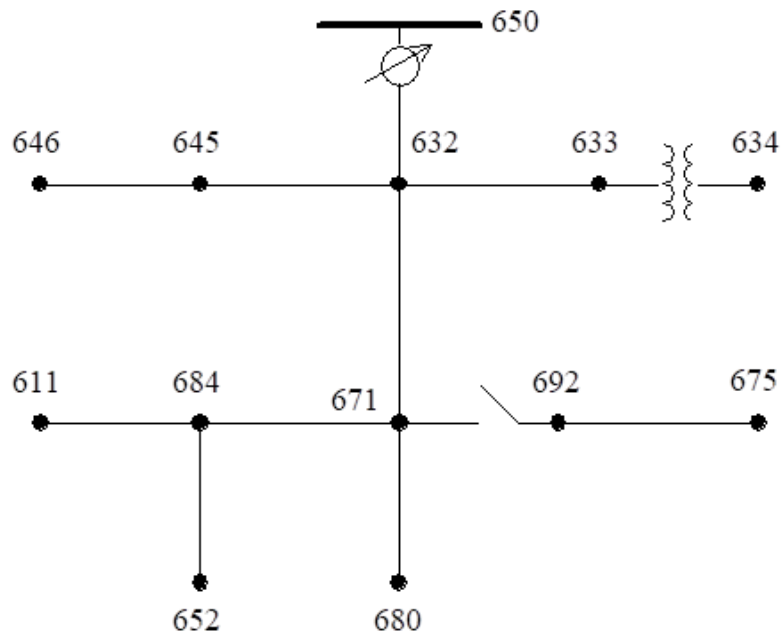
Igualmente, la Tabla A. 2 en el Anexo B muestra los datos de las cargas conectadas en las barras.

2.2.2. Modelo de 11 barras. El modelo radial de 11 barras está basado en el sistema de 13 barras del IEEE planteado por el Subcomité de análisis de sistemas de distribución ³⁹. Donde nos presenta a detalle sus configuraciones:

- a. Distancias entre nodos y espaciamiento entre los conductores de las fases y el neutro en la estructura donde van soportados.
- b. Distancias entre nodos y espaciamiento entre los conductores de las fases subterráneos.
- c. Características de los conductores.
- d. Tipo de carga: Según su conexión: delta, estrella, bifásica, monofásica. Y según el modelo de la carga: Potencia constante, corriente constante, impedancia constante.
- e. Compensación reactiva.
- f. El sistema cuenta con un regulador de voltaje, un interruptor y un transformador para atender cargas a 480 V los cuales no se tendrán en cuenta para el caso de estudio.

³⁹ KERSTING, William H. Op. Cit.

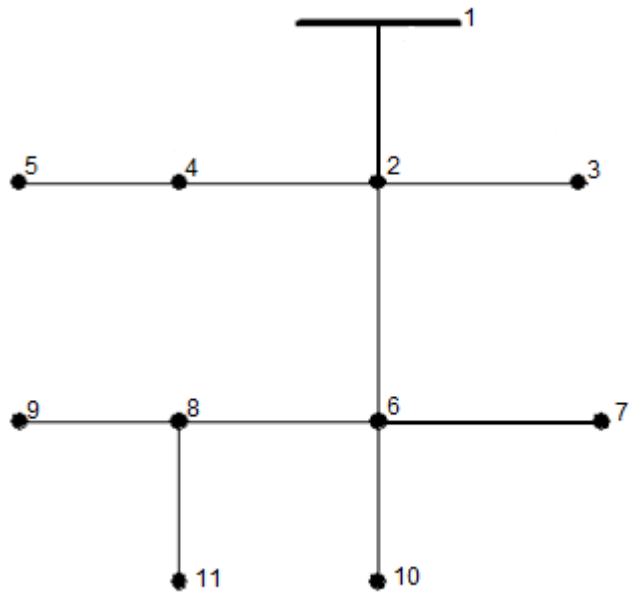
Figura 16. Sistema de 13 barras IEEE



Al no tener en cuenta los reguladores de tensión y el transformador conectado en el *nodo* 633 al *nodo* 634 , visto en la

Figura 16 el sistema muta a una red de 11 barras.

Figura 17. Sistema de 11 barras caso de estudio



Según las modificaciones comentadas sobre el sistema original

Figura 16 donde se cambiaron los nombres de las barras y la eliminación del interruptor se obtiene la Figura 17.

Se utilizaron los valores de impedancias de la línea en [Ω /milla] determinados por el IEEE según las ecuaciones modificadas de Carson⁴⁰. en su modelo original de 13 barras y sus configuraciones. Junto con los valores de la Tabla A. 3 en el Anexo C se obtienen los valores de las impedancias por tramos.

También se definen la compensación reactiva o banco de condensadores conectados en las barras y las cargas según su conexión y modelo mostrando la potencia activa y reactiva consumida por fase.

Para el práctico desarrollo del flujo de potencia todos los valores se manejarán en por unidad (p.u.) con valores base de: $V_{base} = 13,2 \text{ kV}$ y $S_{base} = 10 \text{ MVA}$.

Las conexiones Delta o Estrella y el tipo de carga están dispuestas en la Tabla A. 4 donde 1 representa la presencia de estas en las cargas y en la Tabla A. 5 los valores en por unidad de las cargas conectadas.

La barras a las cuales se conectan bancos de condensadores para hacer compensación reactiva están dadas en la Tabla A. 6 y sus valores en por unidad en la Tabla A. 7 del Anexo C.

⁴⁰ KERSTING W. H., Distribution System Modeling and Analysis, Tercera ed., New Mexico: CRC Press., 2012.

2.3. MÉTODOS PARA EL DESARROLLO DEL FLUJO DE POTENCIA EN EL SISTEMA.

Después de obtener los datos de la simulación de la estación de carga del VE, se procede a realizar un flujo de potencia para determinar los aportes de la estación a la red, en este caso utilizaremos dos métodos basados en el Newton-Raphson, uno llamado barrido hacía adelante y barrido hacía atrás (Backward/forward Sweep) y el otro método de enfoque directo. Los cuales pueden hacer flujo de potencia armónico⁴¹ y flujo de potencia en cargas desbalanceadas⁴².

2.3.1. Backward / forward Sweep (barrido hacía atrás / adelante). Este método de flujo de potencia se desarrolla a partir de Las leyes de corriente y tensión de Kirchhoff, donde su algoritmo se desarrolla de la siguiente manera.

- **Cálculo de corrientes nodales**

Hace parte de la primera iteración donde se asume que el valor de tensión en todas las barras es igual a la barra del alimentador. Consiste en el cálculo de las corrientes donde se encuentran cargas conectadas.

Donde S_k^1 representa la potencia compleja demandada en el nodo n por todas las cargas conectadas a ella.

$$\text{para } k = [1, n] \quad I_k^1 = \left(\frac{S_k^1}{V_k^1} \right)^*$$

Ecuación 18.

⁴¹ ARCHUNDIA-ARANDA, I; MOTA-PALOMINO, R.O *Harmonic Load Flow Method for Radial Distribution Networks*, IEEE, 2010.

⁴² PADARBINDA, Samal; SANJIB, Ganguly *A Modified Forward Backward Sweep Load*, IEEE, 2015

- **Barrido hacia atrás (Backward Sweep)**

Consiste en el cálculo de las corrientes ramales que empieza desde el nodo más distante del alimentador hasta llegar al mismo, este paso es una aplicación de la ley de corrientes de Kirchhoff.

$$\text{para } k = [2, n] \quad I_{(k-1)k}^1 = I_{k(k+1)}^1 + I_k^1$$

Ecuación 19.

- **Barrido hacia adelante (Forward Sweep)**

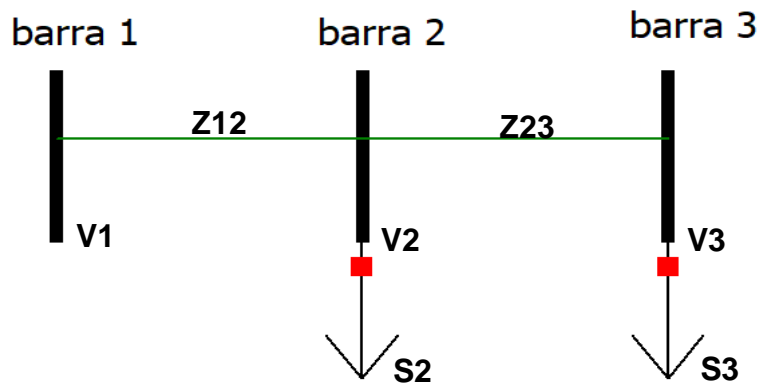
Consiste en la corrección de los voltajes nodales a partir del nodo del alimentador que se considera como barra SLACK hasta el nodo más lejano, siendo una aplicación de la ley de tensiones de Kirchhoff.

$$\text{para } k = [2, n] \quad V_k^1 = V_{(k-1)}^1 - Z_{(k-1)k}^1 I_{(k-1)k}^1$$

Ecuación 20.

En el siguiente sistema se explica de forma detallada el método empleado para realizar la primera iteración de un sistema de 3 barras.

Figura 18. Sistema radial de 3 barras



1. Cálculo de corrientes nodales: Asumiendo que el valor fasorial de tensión en todas las barras es igual al del alimentador o barra 1 según la Ecuación 18.

$$\text{para la barra } 3; k = 3 \quad I_3^1 = \left(\frac{S_3^1}{V_3^1} \right)^*$$

2. Barrido hacia atrás (Backward Sweep), para la Figura 18 se escribe la ecuación de la corriente ramal 1-2 como se muestra en la Ecuación 19.

$$\text{Ecuación 20 para la rama } 1 \text{ a } 2; k = 2 \quad I_{12}^1 = I_{23}^1 + I_2^1$$

3. Barrido hacia adelante (Forward Sweep) Según el sistema mostrado en la figura 15. Se escribe de la siguiente manera según la Ecuación 20.

$$\text{para la barra } 3; k = 3 \quad V_3^1 = V_2^1 - Z_{23}^1 I_{23}^1$$

Los pasos 1, 2 y 3 se repiten de forma iterativa hasta que la diferencia entre los valores de las tensiones siguientes con respecto a los anteriores sea un valor pequeño o según lo establecido por una tolerancia.

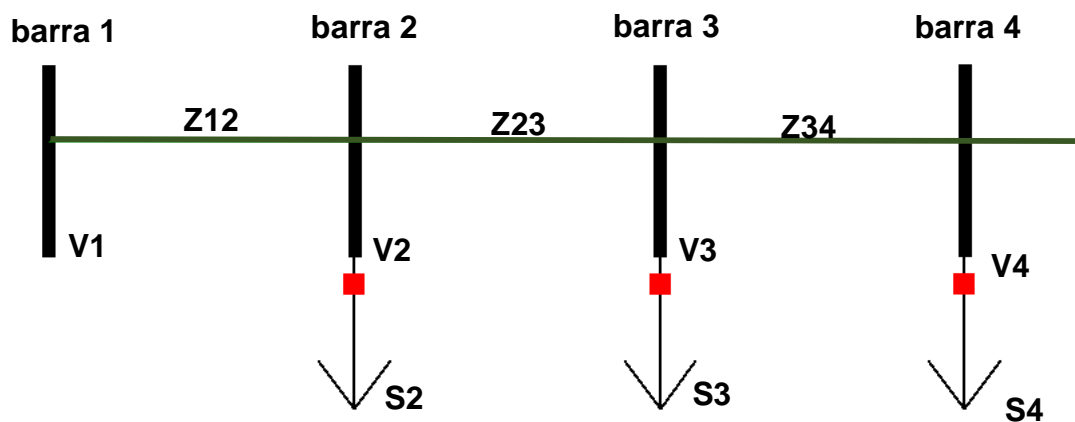
2.3.2 Método de enfoque directo para solución de flujo de potencia. La solución del flujo de potencia se halla a partir de la construcción y multiplicación de dos matrices, las cuales son:

- a. Inyección en la barra a corriente ramal [BIBC].

- b. Corriente ramal a tensión de barra [BCBV] y el cálculo de las impedancias en las cargas. Este método ha sido desarrollado por Jen-Hao⁴³ basándose en el método Backward/Forward Sweep para construir las matrices.

Con el propósito de explicar este método se hace necesario utilizar un ejemplo para la construcción de las matrices.

Figura 19. Sistema radial de 4 barras



1. Matriz de inyección en la barra a corriente ramal [BIBC]

Las siglas provienen de su nombre en inglés Bus injection to Bus currents, esta matriz se forma a partir del barrido hacia atrás y se organizan sus ecuaciones en orden desde la primera barra hasta la última.

Según el sistema mostrado en la Figura 19. las corrientes ramales son las siguientes.

⁴³ MURTADHA OTHMAN, Muhammad; MOHD SHOKRI, Siti Mariam; ABDUL RAZAK, Muhd Azri; ZILAILA, Zakaria A Direct Approach Used for Solving the Distribution System and Harmonic Load Flow Solutions,» de *IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference*, 2013.

$$\begin{aligned}
 I_{34}^1 &= I_4^1 \\
 I_{23}^1 &= I_3^1 + I_{34}^1 = I_3^1 + I_4^1 \\
 I_{12}^1 &= I_2^1 + I_{23}^1 = I_2^1 + I_3^1 + I_4^1
 \end{aligned}$$

Ecuación 21.

Luego, se organizan las ecuaciones de manera matricial.

$$\begin{bmatrix} I_{12}^1 \\ I_{23}^1 \\ I_{34}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_2^1 \\ I_3^1 \\ I_4^1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 22.

$$[\textit{Corriente ramal}] = [\textit{BIBC}] \cdot \begin{bmatrix} \textit{Inyección de corriente} \\ \textit{ó} \\ \textit{Corriente nodal} \end{bmatrix}$$

Ecuación 23.

2. Matriz de corriente ramal a tensión de barra (BCBV)

Del inglés Bus current to Bus voltage, (BCBV) se construye a partir del barrido hacia adelante y de igual manera se organizan las ecuaciones de la segunda barra hasta la última según la Figura 18.

$$\begin{aligned}
 V_2^1 &= V_1^1 - I_{12}^1 \cdot Z_{12} \\
 V_3^1 &= V_2^1 - I_{23}^1 \cdot Z_{23} = V_1^1 - I_{12}^1 \cdot Z_{12} - I_{23}^1 \cdot Z_{23} \\
 V_4^1 &= V_3^1 - I_{34}^1 \cdot Z_{34} = V_1^1 - I_{12}^1 \cdot Z_{12} - I_{23}^1 \cdot Z_{23} - I_{34}^1 \cdot Z_{34}
 \end{aligned}$$

Ecuación 24.

Al organizar las ecuaciones de manera matricial obtenemos:

$$\begin{bmatrix} V_2^1 \\ V_3^1 \\ V_4^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1^1 \\ V_1^1 \\ V_1^1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{12}^1 \\ I_{23}^1 \\ I_{34}^1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 25.

Se ajusta la Ecuación 25 con el propósito de obtener $[\Delta V]$ a partir de la diferencia entre la tensión en la barra 1 o barra slack y las demás barras.

$$\begin{bmatrix} V_1^1 \\ V_1^1 \\ V_1^1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_2^1 \\ V_3^1 \\ V_4^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{12}^1 \\ I_{23}^1 \\ I_{34}^1 \end{bmatrix}$$

$$[\Delta V] = [BCBV] \cdot [\textit{Corriente ramal}]$$

Ecuación 26.

Luego se reemplaza la Ecuación 22 en la Ecuación 26. Donde se multiplica $[BIBC]$ y $[BCBV]$, para crear la matriz $[DLF]$ llamada flujo de potencia de distribución que en inglés Distribution Load Flow.

$$\begin{bmatrix} V_2^1 \\ V_3^1 \\ V_4^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1^1 \\ V_1^1 \\ V_1^1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_2^1 \\ I_3^1 \\ I_4^1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 27.

$$[\mathbf{DLF}] = [\mathbf{BIBC}] \cdot [\mathbf{BCBV}]$$

$$[\Delta V] = [\mathbf{DLF}] \cdot [\textit{Corriente nodal}]$$

Ecuación 28.

Después de obtener las ecuaciones, inicia el proceso iterativo donde primero se hallan las corrientes nodales, según la Ecuación 18 se reemplazan los valores en la

Ecuación 28 y finalmente se hallan los resultados de tensión en las barras para la siguiente iteración.

La cantidad de iteraciones que se hagan en el flujo de potencia dependerá de la tolerancia que se defina previamente.

$$\begin{bmatrix} V_2^2 \\ V_3^2 \\ V_4^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1^1 \\ V_1^1 \\ V_1^1 \end{bmatrix} - [\Delta V^1]$$

Ecuación 29.

$$[V_k^2] = [V_1^1] - [\Delta V^1]$$

2.4 FLUJO DE POTENCIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN RADIALES DESBALANCEADOS

Lo mostrado sobre los dos métodos de flujos de potencia se realizaba considerando sistemas trifásicos balanceados donde es posible aproximar a un sistema monofásico o su forma unifilar.

Para desarrollar los métodos Backward/Forward Sweep o de enfoque directo es necesario conocer los valores por fase del sistema de distribución considerando líneas trifásicas, bifásicas y monofásicas.

Utilizando el mismo diagrama de la Figura 18, donde las líneas en el sistema están dispuestas según la Cuadro 6 en el cuál cada uno (1) en la tabla representa la presencia de la respectiva fase en el tramo.

Cuadro 6. Configuración del sistema de 3 barras

Tramo	Fases		
	A	B	C
1- 2	1	1	1
2- 3	1	1	1

Los valores de tensión en las barras son:

$$[V_{1abc}^1] = \begin{bmatrix} V_{1a}^1 \\ V_{1b}^1 \\ V_{1c}^1 \end{bmatrix}; [V_{2abc}^1] = \begin{bmatrix} V_{2a}^1 \\ V_{2b}^1 \\ V_{2c}^1 \end{bmatrix}; [V_{3abc}^1] = \begin{bmatrix} V_{3a}^1 \\ V_{3b}^1 \\ V_{3c}^1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 30.

Los valores de impedancia según el tramo son:

$$[Z_{12abc}] = \begin{bmatrix} Z_{12}^{aa} & Z_{12}^{ab} & Z_{12}^{ac} \\ Z_{12}^{ba} & Z_{12}^{bb} & Z_{12}^{bc} \\ Z_{12}^{ca} & Z_{12}^{cb} & Z_{12}^{cc} \end{bmatrix}; [Z_{23abc}] = \begin{bmatrix} Z_{23}^{aa} & Z_{23}^{ab} & Z_{23}^{ac} \\ Z_{23}^{ba} & Z_{23}^{bb} & Z_{23}^{bc} \\ Z_{23}^{ca} & Z_{23}^{cb} & Z_{23}^{cc} \end{bmatrix}$$

Ecuación 31.

En los dos métodos es necesario escribir las ecuaciones para adecuar el flujo de potencia armónico a un sistema desbalanceado.

2.4.1. Backward/forward sweep para sistemas desbalanceados. Para desarrollar el flujo de potencia hay que ajustar los valores según como se mostró en la Ecuación 30 y Ecuación 31, según la Figura 18, la Cuadro 6 y considerando la carga en las barras 2 y 3 conectadas en estrella y de impedancia constante.

- a. Cálculo de corrientes nodales: Se muestran las expresiones de corriente en la primera iteración para las barras 2 y 3.

para la barra 3;

$$\begin{bmatrix} IL_{3a}^1 \\ IL_{3b}^1 \\ IL_{3c}^1 \end{bmatrix} = \frac{\begin{pmatrix} S_{3a}^1 \\ S_{3b}^1 \\ S_{3c}^1 \end{pmatrix}^*}{\begin{pmatrix} V_{3a}^1 \\ V_{3b}^1 \\ V_{3c}^1 \end{pmatrix}} = \begin{bmatrix} |IL_{3a}^1| \angle \alpha_{3a}^1 \\ |IL_{3b}^1| \angle \alpha_{3b}^1 \\ |IL_{3c}^1| \angle \alpha_{3c}^1 \end{bmatrix}$$

para la barra 2;

$$\begin{bmatrix} IL_{2a}^1 \\ IL_{2b}^1 \\ IL_{2c}^1 \end{bmatrix} = \frac{\begin{pmatrix} S_{2a}^1 \\ S_{2b}^1 \\ S_{2c}^1 \end{pmatrix}^*}{\begin{pmatrix} V_{2a}^1 \\ V_{2b}^1 \\ V_{2c}^1 \end{pmatrix}} = \begin{bmatrix} |IL_{2a}^1| \angle \alpha_{2a}^1 \\ |IL_{2b}^1| \angle \alpha_{2b}^1 \\ |IL_{2c}^1| \angle \alpha_{2c}^1 \end{bmatrix}$$

- b. Barrido hacia atrás (Backward Sweep): Después de obtenidas las corrientes nodales y considerando que las corrientes de rama $[I_{23abc}^1]$ son igual las corrientes $[IL_{3abc}^1]$:

$$\begin{bmatrix} I_{23a}^1 \\ I_{23b}^1 \\ I_{23c}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |IL_{3a}^1| \angle \alpha_{3a}^1 \\ |IL_{3b}^1| \angle \alpha_{3b}^1 \\ |IL_{3c}^1| \angle \alpha_{3c}^1 \end{bmatrix}$$

Tendremos:

para la rama 1 a 2: $[I_{12abc}^1] = [I_{23abc}^1] + [I_{2abc}^1] = [I_{3abc}^1] + [I_{2abc}^1]$

matricialmente:

$$\begin{bmatrix} I_{12a}^1 \\ I_{12b}^1 \\ I_{12c}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |IL_{3a}^1| \angle \alpha_{3a}^1 \\ |IL_{3b}^1| \angle \alpha_{3b}^1 \\ |IL_{3c}^1| \angle \alpha_{3c}^1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} |IL_{2a}^1| \angle \alpha_{2a}^1 \\ |IL_{2b}^1| \angle \alpha_{2b}^1 \\ |IL_{2c}^1| \angle \alpha_{2c}^1 \end{bmatrix}$$

- c. Barrido hacia adelante (Forward Sweep). Según el sistema mostrado en la Figura 15 considerando la Ecuación 30 y Ecuación 31.

para la barra 3: $[V_{3abc}^1] = [V_{2abc}^1] - [Z_{23abc}^1] \cdot [I_{23abc}^1]$

matricialmente:
$$\begin{bmatrix} V_{3a}^1 \\ V_{3b}^1 \\ V_{3c}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{2a}^1 \\ V_{2b}^1 \\ V_{2c}^1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{23}^{aa} & Z_{23}^{ab} & Z_{23}^{ac} \\ Z_{23}^{ba} & Z_{23}^{bb} & Z_{23}^{bc} \\ Z_{23}^{ca} & Z_{23}^{cb} & Z_{23}^{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} IL_{23a}^1 \\ IL_{23b}^1 \\ IL_{23c}^1 \end{bmatrix}$$

Y así continua sus iteraciones hasta llegar a los valores de tensión deseados o definidos por la tolerancia como se menciona en la explicación del método.

2.4.2. Método de enfoque directo para solución de flujo de potencia en sistemas desbalanceados. Planteando el sistema de la Figura 18, Cuadro 6 y las cargas asumidas en el método Backward/Forward Sweep. Se inicia con las corrientes nodales ya halladas $[IL_{3abc}^1]$ y $[IL_{2abc}^1]$.

- Matriz de inyección en la barra a corriente ramal [BIBC]

Según la Figura 18 y lo explicado anteriormente en el método para sistemas balanceados hallamos las corrientes según la Ecuación 21.

$$[I_{23abc}^1] = [I_{3abc}^1]$$

matricialmente:
$$\begin{bmatrix} I_{23a}^1 \\ I_{23b}^1 \\ I_{23c}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |IL_{3a}^1| \angle \alpha_{3a}^1 \\ |IL_{3b}^1| \angle \alpha_{3b}^1 \\ |IL_{3c}^1| \angle \alpha_{3c}^1 \end{bmatrix}$$

$$[I_{12abc}^1] = [I_{2abc}^1] + [I_{23abc}^1] = [I_{2abc}^1] + [I_{3abc}^1] \quad (1)$$

matricialmente:
$$\begin{bmatrix} I_{12a}^1 \\ I_{12b}^1 \\ I_{12c}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |IL_{2a}^1| \angle \alpha_{2a}^1 \\ |IL_{2b}^1| \angle \alpha_{2b}^1 \\ |IL_{2c}^1| \angle \alpha_{2c}^1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} |IL_{3a}^1| \angle \alpha_{3a}^1 \\ |IL_{3b}^1| \angle \alpha_{3b}^1 \\ |IL_{3c}^1| \angle \alpha_{3c}^1 \end{bmatrix}$$

Al organizar la expresión según la Ecuación 22

$$\begin{bmatrix} I_{12a}^1 \\ I_{12b}^1 \\ I_{12c}^1 \\ I_{23a}^1 \\ I_{23b}^1 \\ I_{23c}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} IL_{2a}^1 \\ IL_{2b}^1 \\ IL_{2c}^1 \\ IL_{3a}^1 \\ IL_{3b}^1 \\ IL_{3c}^1 \end{bmatrix}$$

$$[\textit{Corriente ramal}_{abc}] = [BIBC_{abc}] \cdot \begin{bmatrix} \textit{Inyección de corriente} \\ \textit{ó} \\ \textit{Corriente nodal}_{abc} \end{bmatrix}$$

- Matriz de corriente ramal a tensión de barra. [BCBV]

Según la Figura 18 y lo explicado anteriormente en el método para sistemas balanceados escribimos las ecuaciones de voltaje en las barras según la ley de tensiones de Kirchhoff.

$$[V_{2abc}^1] = [V_{1abc}^1] - [I_{12abc}^1] \cdot [Z_{12abc}]$$

$$\begin{bmatrix} V_{2a}^1 \\ V_{2b}^1 \\ V_{2c}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{1a}^1 \\ V_{1b}^1 \\ V_{1c}^1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_{12a}^1 \\ I_{12b}^1 \\ I_{12c}^1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_{12}^{aa} & Z_{12}^{ab} & Z_{12}^{ac} \\ Z_{12}^{ba} & Z_{12}^{bb} & Z_{12}^{bc} \\ Z_{12}^{ca} & Z_{12}^{cb} & Z_{12}^{cc} \end{bmatrix}$$

$$[V_{3abc}^1] = [V_{1abc}^1] - [I_{12abc}^1] \cdot [Z_{12abc}] - [I_{23abc}^1] \cdot [Z_{23abc}]$$

$$\begin{bmatrix} V_{3a}^1 \\ V_{3b}^1 \\ V_{3c}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{1a}^1 \\ V_{1b}^1 \\ V_{1c}^1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_{12a}^1 \\ I_{12b}^1 \\ I_{12c}^1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_{12}^{aa} & Z_{12}^{ab} & Z_{12}^{ac} \\ Z_{12}^{ba} & Z_{12}^{bb} & Z_{12}^{bc} \\ Z_{12}^{ca} & Z_{12}^{cb} & Z_{12}^{cc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_{23a}^1 \\ I_{23b}^1 \\ I_{23c}^1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_{23}^{aa} & Z_{23}^{ab} & Z_{23}^{ac} \\ Z_{23}^{ba} & Z_{23}^{bb} & Z_{23}^{bc} \\ Z_{23}^{ca} & Z_{23}^{cb} & Z_{23}^{cc} \end{bmatrix}$$

Al organizar según la Ecuación 25 de manera matricial obtenemos:

$$\begin{bmatrix} V_{2a}^1 \\ V_{2b}^1 \\ V_{2c}^1 \\ V_{3a}^1 \\ V_{3b}^1 \\ V_{3c}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{1a}^1 \\ V_{1b}^1 \\ V_{1c}^1 \\ V_{1a}^1 \\ V_{1b}^1 \\ V_{1c}^1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{12}^{aa} & Z_{12}^{ab} & Z_{12}^{ac} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12}^{ba} & Z_{12}^{bb} & Z_{12}^{bc} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12}^{ca} & Z_{12}^{cb} & Z_{12}^{cc} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{23}^{aa} & Z_{23}^{ab} & Z_{23}^{ac} & Z_{23}^{aa} & Z_{23}^{ab} & Z_{23}^{ac} \\ Z_{23}^{ba} & Z_{23}^{bb} & Z_{23}^{bc} & Z_{23}^{ba} & Z_{23}^{bb} & Z_{23}^{bc} \\ Z_{23}^{ca} & Z_{23}^{cb} & Z_{23}^{cc} & Z_{23}^{ca} & Z_{23}^{cb} & Z_{23}^{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{12a}^1 \\ I_{12b}^1 \\ I_{12c}^1 \\ I_{23a}^1 \\ I_{23b}^1 \\ I_{23c}^1 \end{bmatrix}$$

Acomodando la expresión según la Ecuación 26.

$$\begin{bmatrix} V_{1a}^1 \\ V_{1b}^1 \\ V_{1c}^1 \\ V_{1a}^1 \\ V_{1b}^1 \\ V_{1c}^1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{2a}^1 \\ V_{2b}^1 \\ V_{2c}^1 \\ V_{3a}^1 \\ V_{3b}^1 \\ V_{3c}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12}^{aa} & Z_{12}^{ab} & Z_{12}^{ac} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12}^{ba} & Z_{12}^{bb} & Z_{12}^{bc} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12}^{ca} & Z_{12}^{cb} & Z_{12}^{cc} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{23}^{aa} & Z_{23}^{ab} & Z_{23}^{ac} & Z_{23}^{aa} & Z_{23}^{ab} & Z_{23}^{ac} \\ Z_{23}^{ba} & Z_{23}^{bb} & Z_{23}^{bc} & Z_{23}^{ba} & Z_{23}^{bb} & Z_{23}^{bc} \\ Z_{23}^{ca} & Z_{23}^{cb} & Z_{23}^{cc} & Z_{23}^{ca} & Z_{23}^{cb} & Z_{23}^{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{12a}^1 \\ I_{12b}^1 \\ I_{12c}^1 \\ I_{23a}^1 \\ I_{23b}^1 \\ I_{23c}^1 \end{bmatrix}$$

$$[\Delta V_{abc}] = [BCBV_{abc}] \cdot [Corriente ramal_{abc}]$$

Luego se multiplica $[BIBC_{abc}]$ y $[BCBV_{abc}]$, para crear la matriz $[DLF_{abc}]$ llamada flujo de potencia de distribución que en inglés Distribution Load Flow según la Ecuación 27.

$$\begin{bmatrix} V_{1a}^1 \\ V_{1b}^1 \\ V_{1c}^1 \\ V_{1a}^1 \\ V_{1b}^1 \\ V_{1c}^1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{2a}^1 \\ V_{2b}^1 \\ V_{2c}^1 \\ V_{3a}^1 \\ V_{3b}^1 \\ V_{3c}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12}^{aa} & Z_{12}^{ab} & Z_{12}^{ac} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12}^{ba} & Z_{12}^{bb} & Z_{12}^{bc} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12}^{ca} & Z_{12}^{cb} & Z_{12}^{cc} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{23}^{aa} & Z_{23}^{ab} & Z_{23}^{ac} & Z_{23}^{aa} & Z_{23}^{ab} & Z_{23}^{ac} \\ Z_{23}^{ba} & Z_{23}^{bb} & Z_{23}^{bc} & Z_{23}^{ba} & Z_{23}^{bb} & Z_{23}^{bc} \\ Z_{23}^{ca} & Z_{23}^{cb} & Z_{23}^{cc} & Z_{23}^{ca} & Z_{23}^{cb} & Z_{23}^{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} IL_{2a}^1 \\ IL_{2b}^1 \\ IL_{2c}^1 \\ IL_{3a}^1 \\ IL_{3b}^1 \\ IL_{3c}^1 \end{bmatrix}$$

$$[DLF_{abc}] = [BIBC_{abc}] \cdot [BCBV_{abc}]$$

$$[\Delta V_{abc}] = [DLF_{abc}] \cdot [Corriente\ nodal_{abc}]$$

- Finalmente se desarrolla el proceso iterativo según lo explicado en la Ecuación 29.

$$\begin{bmatrix} V_2^2 \\ V_3^2 \\ V_4^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1^1 \\ V_1^1 \\ V_1^1 \end{bmatrix} - [\Delta V^1]$$

Hasta encontrar los valores de tensión en las barras que cumplan con la tolerancia definida.

2.5. FLUJO DE POTENCIA ARMÓNICO

Para hallar los valores de tensión y corriente en el sistema según las componentes armónicas, se debe realizar un flujo de potencia con los métodos mencionados considerando las frecuencias de interés, el algoritmo para el flujo armónico es⁴⁴:

1. Se debe hallar los valores de tensión y corriente a frecuencia fundamental mediante un flujo de potencia.
2. Modelar las cargas lineales y elementos del sistema en función de las frecuencias de interés.
3. Inicializar los valores de tensión, los cuales se hallan a partir de las corrientes armónicas de las cargas no lineales y asumiendo el voltaje armónico en la barra del alimentador igual a cero.

⁴⁴ ARCHUNDIA-ARANDA, I; MOTA-PALOMINO, R.O Op. Cit.

4. Luego de tener inicializados los valores de tensión, se hallan los valores finales de tensión mediante el desarrollo de los métodos según los armónicos de interés.

2.6 PLANTEAMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO

Identificar las diferencias que se puedan presentar en los resultados de los flujos de potencia en los sistemas de 11 y 33 barras se considera valioso, ya que, de esta manera es posible comparar comportamientos. Con esto en mente, es necesario realizar el flujo de potencia en los modelos sin estaciones incorporadas, así se obtiene una visión previa de las tensiones y corrientes sin armónicos significativos provenientes de las estaciones, para los siguientes pasos es importante aclarar que las barras en donde serán incorporadas las estaciones poseen una carga que será removida para alimentar la estación exclusivamente, con el fin de facilitar los cálculos. Si se desea realizar un estudio en el cuál la barra que alimenta la estación también posea cargas diferentes a esta, simplemente se suman las corrientes que salen de la barra con las del punto de carga y se incorpora el resultado al proceso.

2.6.1. Sistema de 33 barras sin estaciones incorporadas. Los métodos iterativos para hallar los valores de tensión en las barras y corriente ramal serán el barrido hacia atrás/adelante y de enfoque directo, de los cuales se mostrará una comparativa de los resultados durante la primera iteración como la

Cuadro 7 y Cuadro 8 **Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Luego los resultados del sistema al converger mostrados en la Cuadro 9 **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Cuadro 7. Comparativa de valores de tensión en sistema 33 barras

Número de Barra	Tensión de barra en primera iteración			
	Barrido Atrás/Adelante		Método Enfoque Directo	
	Vbarra	Ángulo (°)	Vbarra	Ángulo (°)
1	1	0	1	0
2	0.99741	0.01241	0.9999	0.0003
3	0.98520	0.08230	0.9997	-0.0009
4	0.97881	0.13830	0.9997	0.0023
5	0.97251	0.19572	0.9998	-0.0001
6	0.95684	0.11585	0.9996	-0.0086
7	0.95387	-0.08024	0.9994	-0.0346
8	0.94975	-0.05094	0.9990	0.0079
9	0.94444	-0.11411	0.9996	-0.0078
10	0.93953	-0.16817	0.9996	-0.0077
11	0.93880	-0.16221	0.9999	0.0010
12	0.93753	-0.15396	0.9998	0.0018
13	0.93238	-0.23196	0.9993	-0.0059
14	0.93048	-0.29810	0.9993	-0.0139
15	0.92929	-0.32994	0.9998	-0.0084
16	0.92814	-0.34979	0.9997	-0.0059
17	0.92645	-0.41462	0.9994	-0.0255
18	0.92594	-0.42278	0.9995	-0.0073
19	0.99693	0.00243	0.9999	-0.0025
20	0.99366	-0.05897	0.9989	-0.0204
21	0.99302	-0.07672	0.9997	-0.0088
22	0.99244	-0.09532	0.9994	-0.0184
23	0.98200	0.05453	0.9997	-0.0017
24	0.97604	-0.02490	0.9970	-0.0390
25	0.97308	-0.06387	0.9970	-0.0380
26	0.95520	0.15016	0.9999	-0.0004
27	0.95303	0.19823	0.9999	-0.0005
28	0.94335	0.27218	0.9995	-0.0115
29	0.93640	0.34094	0.9992	-0.0091
30	0.93341	0.43040	0.9985	0.0832
31	0.92989	0.36125	0.9988	-0.0251
32	0.92911	0.34228	0.9994	-0.0148
33	0.92888	0.33596	0.9998	-0.0060

La

Cuadro 7. Muestra las tensiones de la simulación flujo de potencia en el método de barrido hacia atrás y hacia adelante y del método de enfoque directo.

Cuadro 8. Comparativa de corrientes ramales sistema de 33 barras

Rama		Corriente ramal en primera iteración			
		Barrido Atrás/Adelante		Método Aproximado	
		Iramal	Ángulo (°)	Iramal	Ángulo (°)
1	2	0.45905	-31.85451	0.43694	-31.76213
2	3	0.40813	-32.63907	0.38628	-32.57927
3	4	0.29327	-35.38715	0.27429	-35.42840
4	5	0.27853	-35.48485	0.25987	-35.52486
5	6	0.27171	-35.71604	0.25325	-35.76123
6	7	0.12719	-25.57873	0.11898	-25.38053
7	8	0.10368	-25.33529	0.09663	-25.10645
8	9	0.08006	-24.95634	0.07428	-24.66739
9	10	0.07338	-25.54154	0.06799	-25.24597
10	11	0.06668	-26.24248	0.06172	-25.94230
11	12	0.06095	-25.52115	0.05636	-25.20112
12	13	0.05353	-24.84103	0.04945	-24.49190
13	14	0.04609	-23.92281	0.04254	-23.55226
14	15	0.03087	-18.85194	0.02846	-18.43495
15	16	0.02439	-21.28195	0.02247	-20.85446
16	17	0.01754	-22.24863	0.01616	-21.80141
17	18	0.01070	-24.41230	0.00985	-23.96249
2	19	0.03964	-24.01906	0.03940	-23.96249
19	20	0.02976	-24.03893	0.02955	-23.96249
20	21	0.01985	-24.04798	0.01970	-23.96249
21	22	0.00993	-24.05733	0.00985	-23.96249
3	23	0.10605	-25.85028	0.10332	-25.82099
23	24	0.09558	-25.50516	0.09304	-25.46335
24	25	0.04786	-25.52509	0.04652	-25.46335
6	26	0.14227	-45.57887	0.13225	-45.91910
26	27	0.13602	-46.70788	0.12630	-47.08548
27	28	0.12982	-47.95075	0.12042	-48.36646
28	29	0.12402	-49.49673	0.11498	-49.93922
29	30	0.11009	-52.09983	0.10200	-52.56840

Rama		Corriente ramal en primera iteración			
		Barrido Atrás/Adelante		Método Aproximado	
		Iramal	Ángulo (°)	Iramal	Ángulo (°)
30	31	0.05080	-26.20492	0.04696	-26.56505
31	32	0.03292	-27.05502	0.03041	-27.40758
32	33	0.00781	-33.34243	0.00721	-33.69007

La Cuadro 8 Muestra las corrientes ramales de la simulación flujo de potencia en el método de barrido hacia atrás y hacia adelante y del método de enfoque directo.

Cuadro 9. Resultados del flujo de potencia por el método B/F.

Número de Barra	Tensión de barra		Rama		Corriente ramal	
	Vbarra	Ángulo (°)			Iramal	Ángulo (°)
1	1	0	1	2	0.4591	-31.8545
2	0.9973	0.0133	2	3	0.4081	-32.6391
3	0.9844	0.0880	3	4	0.2933	-35.3872
4	0.9775	0.1477	4	5	0.2785	-35.4849
5	0.9708	0.2091	5	6	0.2717	-35.7160
6	0.9540	0.1226	6	7	0.1272	-25.5787
7	0.9508	-0.0870	7	8	0.1037	-25.3353
8	0.9464	-0.0544	8	9	0.0801	-24.9563
9	0.9407	-0.1210	9	10	0.0734	-25.5415
10	0.9353	-0.1780	10	11	0.0667	-26.2425
11	0.9346	-0.1713	11	12	0.0609	-25.5211
12	0.9332	-0.1619	12	13	0.0535	-24.8410
13	0.9276	-0.2447	13	14	0.0461	-23.9228
14	0.9255	-0.3159	14	15	0.0309	-18.8519
15	0.9242	-0.3501	15	16	0.0244	-21.2819
16	0.9230	-0.3712	16	17	0.0175	-22.2486
17	0.9211	-0.4412	17	18	0.0107	-24.4123
18	0.9206	-0.4498	2	19	0.0396	-24.0191
19	0.9968	0.0033	19	20	0.0298	-24.0389
20	0.9935	-0.0583	20	21	0.0198	-24.0480
21	0.9929	-0.0761	21	22	0.0099	-24.0573
22	0.9923	-0.0948	3	23	0.1061	-25.8503

Número de Barra	Tensión de barra		Rama		Corriente ramal	
	Vbarra	Ángulo (°)			Iramal	Ángulo (°)
23	0.9811	0.0596	23	24	0.0956	-25.5052
24	0.9750	-0.0218	24	25	0.0479	-25.5251
25	0.9719	-0.0617	6	26	0.1423	-45.5789
26	0.9522	0.1590	26	27	0.1360	-46.7079
27	0.9499	0.2101	27	28	0.1298	-47.9507
28	0.9394	0.2856	28	29	0.1240	-49.4967
29	0.9319	0.3567	29	30	0.1101	-52.0998
30	0.9287	0.4522	30	31	0.0508	-26.2049
31	0.9249	0.3756	31	32	0.0329	-27.0550
32	0.9240	0.3546	32	33	0.0078	-33.3424
33	0.9238	0.3476				

En los resultados mostrados en la Cuadro 9 se evidenció que el sistema presenta caídas de tensión en las barras más lejanas al transformador, concluyendo así, que no hay buena regulación de tensión en el sistema de 33 barra

2.6.2. Sistema de 11 barras sin estaciones incorporadas. El método de flujo de potencia para el sistema de 11 barras es el de enfoque directo, en la tabla se muestra los valores obtenidos en la iteración de convergencia.

Cuadro 10. Resultados flujo de potencia del sistema de 11 barras

Nodos	fases	Voltaje de barra	Ángulo (°)	Ramas		fases	Corriente ramal	Ángulo (°)
2	a	1	0	1	2	a	0.158713	-56.96867
	b	0.999978	-120.00073			b	0.143987	-167.01326
	c	0.999978	120.00073			c	0.219693	71.24698
3	a	0.999864	-0.00331	2	3	a	0.019419	-34.51183
	b	0.999871	-120.00311			b	0.015002	-156.87301
	c	0.999870	119.99829			c	0.015002	83.12839
4	b	0.999764	-120.00268	2	4	b	0.034003	-120.01178
	c	0.999978	120.00073			c	0.021099	96.32043

Nodos	fases	Voltaje de barra	Ángulo (°)	Ramas		fases	Corriente ramal	Ángulo (°)
5	b	0.999959	-120.00811	4	5	b	0.021099	-83.67957
	c	0.999857	119.99792			c	0.021099	96.32043
6	a	0.997742	-0.00668	2	6	a	0.140962	-59.98514
	b	0.998044	-120.03044			b	0.109541	178.44174
	c	0.997487	119.95123			c	0.186291	67.54448
7	a	0.999695	0.00295	6	7	a	0.062254	-38.80063
	b	0.999892	-119.99519			b	0.026877	164.66156
	c	0.999752	120.00694			c	0.050395	65.14802
8	a	1	0	6	8	a	0.015419	153.88786
	c	0.99998	120.00073			c	0.024763	73.36434
9	c	0.99983	120.00092	8	9	c	0.024763	73.36434
10	a	1	0	6	10	a	0	0
	b	0.99998	-120.00073			b	0	0
	c	0.99998	120.00073			c	0	0
11	c	0.99987	119.99171	8	11	c	0.01542	153.8879

Los resultados la Cuadro 10 muestran un sistema de 11 barras el cual no aparenta un desbalance significativo.

2.6.3. Incorporación de las estaciones en el sistema de 33 barras según la cantidad ve y modo de operación. Al establecer los valores y modelos de los diferentes elementos que componen el caso de estudio, se procede a definir los puntos de conexión de las estaciones de carga en las redes de 11 barras y 33 barras, considerando estados de carga (*SOC*) o nivel de carga del vehículo al iniciar el proceso y en puntos que se consideran críticos.

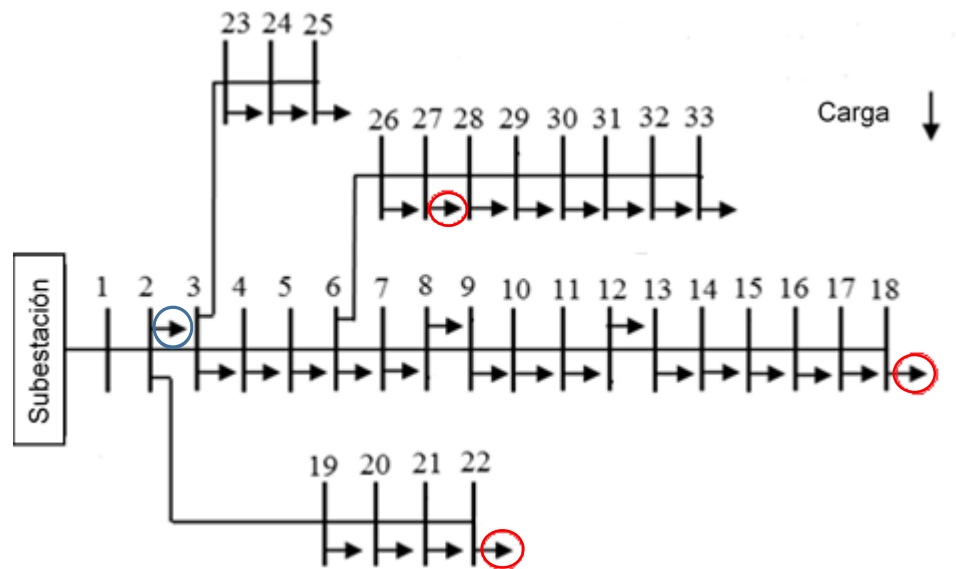
En el caso de estudio con el SDEE de 33 barras se tuvo en cuenta un documento de ubicación óptima de estaciones de carga de vehículos eléctricos ⁴⁵ donde se utilizó la misma red radial. Según esto, se define que las estaciones de carga en el

⁴⁵ ARDILA PRADA, Brayan; OCHOA VILLABONA, Yeison

sistema estarán conectadas a las barras 18, 22 y 27. Señaladas con **rojo** en la Figura 20.

Y al considerar una sola estación se establece la conexión en la barra más cercana al transformador, en nuestro caso conectada en la barra 2, señalada con **azul** en la Figura 20.

Figura 20. Estaciones de carga en sistema de 33 barras



2.6.4. Casos de estudio para el modelo de 33 barras

1. **Caso de estudio 1:** Para el primer caso de estudio se incorpora una sola estación, la cual opera con un vehículo conectado cuyo SOC corresponde al 70% y se considera estará cargando un tiempo de 30 minutos específicamente en la barra 2 Figura 20.
2. **Caso de estudio 2:** En el segundo caso se incorporan al sistema 3 estaciones, una en la barra 18 otra en la barra 22 y la última en la barra 27 de igual manera que en el caso anterior con vehículos conectados en un estado de carga del 70%

y 30 minutos de conexión, es decir 3 VE conectados simultáneamente en las mismas condiciones, pero en 3 puntos diferentes. El incremento en la conexión de estaciones se realiza a propósito, esperando visualizar un aumento progresivo de la distorsión armónica, es decir, a mayor cantidad de estaciones, mayor cantidad de armónicos.

3. **Caso de estudio 3:** El tercer caso de este sistema se realizará de nuevo con 3 estaciones, las cuales poseen diferentes estados de carga y tiempo de conexión así: En la barra 18 un SOC de 50% y 40 minutos de carga, en la barra 22 un SOC del 70% y 30 minutos de carga y en la barra 27 un SOC del 30% con 50 minutos de carga, vale la pena aclarar que en este caso los vehículos conectados en las barras 22 y 27 están próximos a finalizar su carga, o sea su SOC en el momento de simular el flujo de potencia sería del 90% con el propósito de visualizar la inyección de corriente armónica al sistema debido al cambio de operación de corriente constante a tensión constante por parte del convertidor DC/DC considerando esto como un punto crítico.

Cuadro 11. Resumen de casos de estudio para sistema de 33 barras

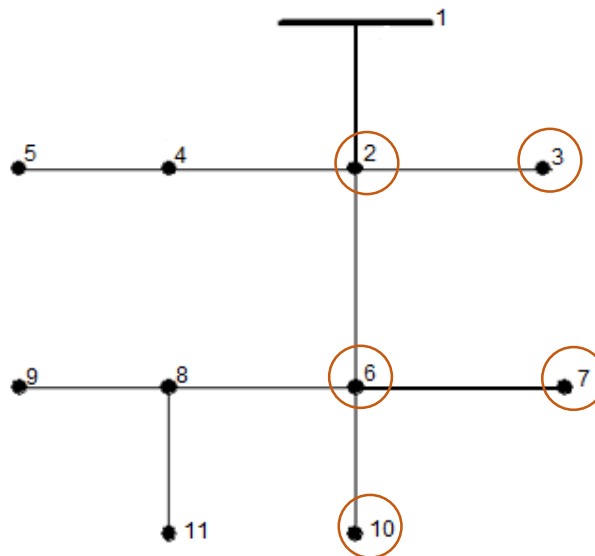
Caso de estudio	Barras conectadas	SOC (%)	Tiempo de carga (minutos)
1	2	70	30
2	18	70	30
	22	70	30
	27	70	30
3	18	50	40
	22	70	30
	27	30	50

La Cuadro 11 resume brevemente cuál es la disposición de las estaciones en los casos de estudio 1, 2 y 3.

2.6.5. Incorporación de las estaciones en el sistema de 11 barras según la cantidad ve y modo de operación. Para el caso de la red de 11 nodos, las posibles barras para conectar las estaciones son: 2 ,3, 6, 7 y 10. Debido a que según la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** el nivel de carga 3 requiere conexión trifásica Figura 20.

Considerando minimizar las pérdidas de potencia en el sistema, se establece conectar la estación de carga a la barra más cercana al transformador, que en este caso de estudio es la barra 2.

Figura 21. Barras disponibles para conectar la estación de carga



2.6.6. Casos de estudio para el modelo de 11 barras

1. **Caso de estudio 4:** Para el cuarto caso se incorporará una sola estación debido al tamaño del sistema, en este caso el vehículo se conecta con un SOC del 30% para 50 minutos de carga.

2. **Caso de estudio 5:** En el quinto caso se mantendrá la misma estación conectada cuando el vehículo alcanza el 90% de la carga, con el propósito de visualizar diferencias significativas en la distorsión armónica cuando el convertidor DC/DC cambia de corriente constante a tensión constante.

Cuadro 12. Resumen de los casos de estudio del sistema de 11 barras

Caso de estudio	Barras conectadas	SOC (%)	Tiempo de carga (minutos)
4	2	30	50
5	2	90	-

La Cuadro 12 muestra un breve resumen de la disposición de las estaciones para los casos de estudio 4 y 5.

3. RESULTADOS DE LOS CASOS DE ESTUDIO Y FORMULACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN

En este capítulo se muestran los resultados finales y análisis de los flujos de potencia armónica realizados en los casos de estudio, posteriormente, se realiza una síntesis de la investigación realizada, planteando una serie de aspectos a tener en cuenta en el análisis de distorsión armónica en redes de distribución cuando se conectan estaciones de recarga, demostrando que se pueden emplear para cualquier modelo de SDEE o estación y por lo tanto ser de utilidad en estudios de armónicos futuros, considerando el cambio de paradigma en la movilidad.

3.1. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS CASOS DE ESTUDIO

Los resultados obtenidos se exponen mediante tablas que contienen los valores en magnitud y fase de tensión y corriente desde el tercer hasta el onceavo armónico, destacando magnitudes que aumenten con respecto al caso anterior y al estudio de los sistemas sin estaciones incorporadas.

3.1.1. Caso 1. Para este caso se tiene una estación conectada en la barra 2 del sistema de 33 barras, los resultados a tener en cuenta son las tensiones y corrientes de línea del sistema, de esta manera se busca encontrar diferencias con respecto a los otros casos de estudio.

Cuadro 13. Resultados de tensión caso de estudio 1

Número de Barra	Fund.	h =3	h=5	h=7	h = 9	h = 11
	Vbarra	Vbarra3	Vbarra5	Vbarra7	Vbarra9	Vbarra11
1	1	0.00004824	0.0005908	0.0011	0.00061	0.000217
2	0.997316	4.7911E-05	0.000592	0.0011	0.00061	0.000216
3	0.984421	4.7302E-05	0.0005844	0.001086	0.000602	0.000208
4	0.977586	4.6984E-05	0.0005804	0.001078	0.000598	0.0002038
5	0.970828	4.6668E-05	0.0005764	0.001071	0.000594	0.0001996
6	0.954016	4.5681E-05	0.0005631	0.001045	0.000579	0.0001849
7	0.950838	4.5327E-05	0.0005577	0.001034	0.000573	0.0001784
8	0.946415	4.5146E-05	0.0005555	0.00103	0.000571	0.0001762
9	0.940691	4.4808E-05	0.0005509	0.001021	0.000565	0.0001709
10	0.935383	4.45E-05	0.0005467	0.001013	0.000561	0.0001661
11	0.934598	4.4469E-05	0.0005463	0.001012	0.00056	0.0001657
12	0.933221	4.4411E-05	0.0005456	0.001011	0.00056	0.000165
13	0.927639	4.4068E-05	0.0005408	0.001001	0.000554	0.0001594
14	0.925571	4.3904E-05	0.0005383	0.000996	0.000551	0.0001563
15	0.924282	4.381E-05	0.0005369	0.000993	0.000549	0.0001545
16	0.923035	4.373E-05	0.0005358	0.000991	0.000548	0.0001533
17	0.921185	4.3573E-05	0.0005335	0.000986	0.000546	0.0001506
18	0.920631	4.3538E-05	0.000533	0.000986	0.000545	0.0001501
19	0.99683	4.7877E-05	0.0005916	0.001099	0.00061	0.0002155
20	0.993542	4.7654E-05	0.0005885	0.001093	0.000606	0.0002121
21	0.992894	4.7604E-05	0.0005878	0.001092	0.000605	0.0002113
22	0.992308	4.7556E-05	0.0005871	0.00109	0.000605	0.0002105
23	0.981131	4.7114E-05	0.000582	0.001081	0.0006	0.0002054
24	0.975013	4.6737E-05	0.0005769	0.001072	0.000594	0.0002
25	0.971964	4.6551E-05	0.0005744	0.001067	0.000591	0.0001973
26	0.952253	4.5604E-05	0.0005622	0.001043	0.000578	0.0001839
27	0.949914	4.5503E-05	0.0005609	0.001041	0.000577	0.0001826
28	0.939466	4.4954E-05	0.0005538	0.001027	0.000569	0.000175
29	0.93196	4.457E-05	0.0005489	0.001018	0.000564	0.0001698
30	0.928718	4.4436E-05	0.0005472	0.001015	0.000563	0.0001681
31	0.92492	4.4181E-05	0.0005438	0.001009	0.000559	0.0001644
32	0.924085	4.4121E-05	0.0005429	0.001007	0.000558	0.0001635

Número de Barra	Fund.	h =3	h=5	h=7	h = 9	h = 11
	Vbarra	Vbarra3	Vbarra5	Vbarra7	Vbarra9	Vbarra11
33	0.923826	4.4103E-05	0.0005427	0.001006	0.000558	0.0001632

En la Cuadro 13 se muestran los resultados de tensión en el caso de estudio 1 Destacando se no se visualizan valores significativamente altos en las tensiones de los armónicos con respecto a la fundamental.

Cuadro 14. Resultados de corriente ramal del caso de estudio 1

Rama		Fund.	h =3	h=5	h=7	h = 9	h = 11
		Iramal	Iramal3	Iramal5	Iramal7	Iramal9	Iramal11
1	2	0.452686	3.76E-05	9.4863E-05	0.000159	1.8527E-05	3.61E-05
2	3	0.408115	1.18E-05	9.8776E-05	0.000137	6.0202E-05	4.98E-05
3	4	0.29326	8.29E-06	6.9464E-05	9.64E-05	4.2494E-05	3.52E-05
4	5	0.278516	7.91E-06	6.6451E-05	9.23E-05	4.0714E-05	3.37E-05
5	6	0.271695	7.71E-06	6.4747E-05	9E-05	3.969E-05	3.29E-05
6	7	0.127189	3.87E-06	3.3008E-05	4.62E-05	2.0493E-05	1.7E-05
7	8	0.103678	3.18E-06	2.7296E-05	3.84E-05	1.7063E-05	1.42E-05
8	9	0.080059	2.48E-06	2.1562E-05	3.05E-05	1.3618E-05	1.14E-05
9	10	0.073381	2.24E-06	1.943E-05	2.75E-05	1.2271E-05	1.03E-05
10	11	0.066674	2.01E-06	1.7291E-05	2.45E-05	1.092E-05	9.13E-06
11	12	0.060943	1.86E-06	1.6143E-05	2.29E-05	1.0241E-05	8.57E-06
12	13	0.053531	1.66E-06	1.4531E-05	2.07E-05	9.2819E-06	7.78E-06
13	14	0.046085	1.46E-06	1.2921E-05	1.85E-05	8.3228E-06	6.99E-06
14	15	0.030865	1.08E-06	9.9068E-06	1.44E-05	6.5253E-06	5.5E-06
15	16	0.024387	8.14E-07	7.0827E-06	9.93E-06	4.3897E-06	3.64E-06
16	17	0.017544	5.73E-07	4.9291E-06	6.88E-06	3.0341E-06	2.52E-06
17	18	0.010698	3.32E-07	2.7813E-06	3.83E-06	1.681E-06	1.39E-06
2	19	0.039638	1.25E-06	1.0544E-05	1.46E-05	6.4192E-06	5.3E-06
19	20	0.029757	9.37E-07	7.9107E-06	1.1E-05	4.8156E-06	3.98E-06
20	21	0.019845	6.25E-07	5.2739E-06	7.3E-06	3.2104E-06	2.65E-06
21	22	0.009925	3.12E-07	2.637E-06	3.65E-06	1.6051E-06	1.33E-06
3	23	0.106048	3.2E-06	2.6649E-05	3.67E-05	1.6084E-05	1.33E-05
23	24	0.095572	2.91E-06	2.424E-05	3.34E-05	1.4646E-05	1.21E-05

Rama		Fund.	h =3	h=5	h=7	h = 9	h = 11
		Iramal	Iramal3	Iramal5	Iramal7	Iramal9	Iramal11
24	25	0.047861	1.46E-06	1.2132E-05	1.67E-05	7.3297E-06	6.05E-06
6	26	0.142268	3.63E-06	2.9786E-05	4.09E-05	1.7899E-05	1.48E-05
26	27	0.136017	3.42E-06	2.7916E-05	3.83E-05	1.6746E-05	1.38E-05
27	28	0.129811	3.2E-06	2.6044E-05	3.57E-05	1.5591E-05	1.29E-05
28	29	0.124014	2.98E-06	2.3966E-05	3.27E-05	1.4248E-05	1.17E-05
29	30	0.110085	2.57E-06	2.0677E-05	2.82E-05	1.2294E-05	1.01E-05
30	31	0.050801	1.51E-06	1.2492E-05	1.72E-05	7.517E-06	6.2E-06
31	32	0.032914	9.62E-07	7.9192E-06	1.09E-05	4.7538E-06	3.92E-06
32	33	0.007806	2E-07	1.5836E-06	2.14E-06	9.3092E-07	7.65E-07

En la Cuadro 14 se muestran los resultados en corriente en el caso de estudio 1, el armónico con corriente más alta es el séptimo en la rama 1 a 2 ya que es ahí en donde está conectada la estación, pero sigue siendo reducido con respecto a la fundamental.

3.1.2. Caso 2. En este caso se encuentran 3 estaciones conectadas en las barras 18, 22 y 27 del sistema de 33 barras.

Cuadro 15. Resultados tensiones de barras caso de estudio 2

Número de Barra	Fund.	h =3	h=5	h=7	h = 9	h = 11
	Vbarra	Vbarra3	Vbarra5	Vbarra7	Vbarra9	Vbarra11
1	1	4.82E-05	0.000591	0.0011	0.00061	0.000217
2	0.997342	4.75E-05	0.000597	0.001106	0.000614	0.0002171
3	0.984642	4.5E-05	0.000618	0.001123	0.000625	0.0002151
4	0.977949	4.32E-05	0.000635	0.00114	0.000636	0.0002155
5	0.97134	4.15E-05	0.000653	0.001158	0.000647	0.0002162
6	0.954958	3.73E-05	0.000718	0.001218	0.000687	0.0002203
7	0.951964	3.66E-05	0.000745	0.001241	0.000705	0.0002221
8	0.947735	3.54E-05	0.000756	0.001256	0.000712	0.0002228
9	0.942386	3.39E-05	0.000793	0.001298	0.000735	0.0002277
10	0.937455	3.27E-05	0.00083	0.001342	0.00076	0.0002335
11	0.936723	3.25E-05	0.000834	0.001347	0.000762	0.000234

Número de Barra	Fund.	h =3	h=5	h=7	h = 9	h = 11
	Vbarra	Vbarra3	Vbarra5	Vbarra7	Vbarra9	Vbarra11
12	0.935447	3.21E-05	0.000841	0.001357	0.000767	0.0002351
13	0.930419	3.16E-05	0.000902	0.001431	0.000807	0.0002468
14	0.92862	3.23E-05	0.000939	0.001475	0.000833	0.0002549
15	0.927566	3.28E-05	0.000968	0.001512	0.000852	0.0002615
16	0.926584	3.34E-05	0.000998	0.001552	0.000874	0.0002692
17	0.925374	3.76E-05	0.001095	0.001678	0.000942	0.0002956
18	0.925088	3.9E-05	0.001129	0.001724	0.000966	0.000305
19	0.996918	4.71E-05	0.000606	0.001114	0.00062	0.000219
20	0.994177	4.32E-05	0.000682	0.00119	0.000673	0.0002368
21	0.993702	4.22E-05	0.00071	0.001218	0.000692	0.0002437
22	0.993437	4.07E-05	0.000763	0.001276	0.000731	0.0002583
23	0.981351	4.48E-05	0.000615	0.001118	0.000623	0.0002124
24	0.975235	4.44E-05	0.00061	0.001109	0.000617	0.0002068
25	0.972187	4.42E-05	0.000607	0.001104	0.000614	0.000204
26	0.953209	3.69E-05	0.000723	0.001224	0.000691	0.0002208
27	0.95089	3.63E-05	0.00073	0.001232	0.000695	0.0002216
28	0.940454	3.59E-05	0.000721	0.001216	0.000686	0.0002125
29	0.932957	3.56E-05	0.000714	0.001205	0.00068	0.0002063
30	0.929718	3.55E-05	0.000712	0.001202	0.000678	0.0002043
31	0.925924	3.53E-05	0.000707	0.001194	0.000673	0.0001998
32	0.92509	3.52E-05	0.000706	0.001192	0.000672	0.0001987
33	0.924831	3.52E-05	0.000706	0.001191	0.000672	0.0001984

En la Cuadro 15 se muestran los resultados de tensión en el caso de estudio 2, se hace evidente una reducción en la tensión fundamental para algunas barras, el armónico con tensión más elevada es el séptimo en la barra 18.

Cuadro 16. Resultados corrientes ramales caso de estudio 2

Rama		Fund.	h =3	h=5	h=7	h = 9	h = 11
		Iramal	Iramal3	Iramal5	Iramal7	Iramal9	Iramal11
1	2	0.4481231	8.59E-05	0.000464	0.000546	0.0001633	4.25E-05
2	3	0.4016265	5.87E-05	0.000277	0.000336	9.098E-05	3.08E-05
3	4	0.2866355	5.58E-05	0.000307	0.00036	0.0001086	2.81E-05

Rama		Fund.	h =3	h=5	h=7	h = 9	h = 11
		Iramal	Iramal3	Iramal5	Iramal7	Iramal9	Iramal11
4	5	0.2718914	5.56E-05	0.00031	0.000362	0.0001105	2.83E-05
5	6	0.2650617	5.54E-05	0.000312	0.000364	0.0001116	2.85E-05
6	7	0.1223346	2.75E-05	0.000153	0.000175	5.39E-05	1.47E-05
7	8	0.0988658	2.71E-05	0.00016	0.000181	5.799E-05	1.53E-05
8	9	0.0753043	2.68E-05	0.000168	0.000189	6.218E-05	1.67E-05
9	10	0.068617	2.67E-05	0.000171	0.000192	6.384E-05	1.73E-05
10	11	0.0618991	2.66E-05	0.000174	0.000196	6.558E-05	1.81E-05
11	12	0.0562163	2.65E-05	0.000175	0.000197	6.65E-05	1.86E-05
12	13	0.0488591	2.65E-05	0.000178	0.0002	6.781E-05	1.93E-05
13	14	0.0414888	2.65E-05	0.000181	0.000202	6.92E-05	2.01E-05
14	15	0.0266309	2.65E-05	0.000186	0.000208	7.193E-05	2.18E-05
15	16	0.0200845	2.64E-05	0.00019	0.000215	7.486E-05	2.34E-05
16	17	0.0132998	2.64E-05	0.000194	0.000219	7.695E-05	2.48E-05
17	18	0.0065939	2.64E-05	0.000198	0.000224	7.92E-05	2.64E-05
2	19	0.0354859	2.71E-05	0.000189	0.000215	7.407E-05	2.29E-05
19	20	0.0256331	2.68E-05	0.000192	0.000218	7.566E-05	2.4E-05
20	21	0.0157879	2.66E-05	0.000195	0.000221	7.741E-05	2.51E-05
21	22	0.0061402	2.64E-05	0.000198	0.000224	7.92E-05	2.64E-05
3	23	0.1060235	3.04E-06	2.82E-05	3.79E-05	1.67E-05	1.38E-05
23	24	0.0955497	2.76E-06	2.56E-05	3.45E-05	1.52E-05	1.25E-05
24	25	0.0478496	1.38E-06	1.28E-05	1.73E-05	7.608E-06	6.28E-06
6	26	0.1405146	2.78E-05	0.000162	0.000192	5.925E-05	1.44E-05
26	27	0.1342364	2.77E-05	0.000164	0.000194	6.059E-05	1.49E-05
27	28	0.1296712	2.55E-06	3.38E-05	4.21E-05	1.874E-05	1.55E-05
28	29	0.1238806	2.37E-06	3.11E-05	3.86E-05	1.713E-05	1.41E-05
29	30	0.1099659	2.05E-06	2.68E-05	3.33E-05	1.478E-05	1.22E-05
30	31	0.0507456	1.2E-06	1.62E-05	2.03E-05	9.037E-06	7.46E-06
31	32	0.0328787	7.66E-07	1.03E-05	1.28E-05	5.715E-06	4.71E-06
32	33	0.0077972	1.6E-07	2.06E-06	2.53E-06	1.119E-06	9.2E-07

En la Cuadro 16 se muestran los resultados en corriente en el caso de estudio 2, el armónico con corriente más alta es el séptimo en la rama 1 a 2, los resultados obtenidos, evidencian un incremento de las componentes armónicas debido al aumento de estaciones conectadas en el sistema.

3.1.3. Caso 3. En este caso se encuentran 3 estaciones conectadas en las barras 18, 22 y 27, estas últimas 2 finalizando la carga en el sistema de 33 barras.

Cuadro 17. Resultados de tensión en las barras caso de estudio 3

Número de Barra	Fund.	h =3	h=5	h=7	h = 9	h = 11
	Vbarra	Vbarra3	Vbarra5	Vbarra7	Vbarra9	Vbarra11
1	1	0.00004824	0.0005908	0.0011	0.0006098	0.000217
2	0.9972395	4.6201E-05	0.0005868	0.0010994	0.0006099	0.0002155
3	0.9841379	3.9779E-05	0.0005834	0.0011002	0.0006123	0.000211
4	0.9771489	3.6728E-05	0.0005846	0.001104	0.0006161	0.0002098
5	0.970231	3.5437E-05	0.0005878	0.0011083	0.0006204	0.0002089
6	0.9530986	4.9523E-05	0.0006286	0.0011234	0.0006413	0.0002102
7	0.9500102	4.9181E-05	0.0006629	0.0011489	0.0006668	0.0002174
8	0.9454939	4.7716E-05	0.0006777	0.0011664	0.0006772	0.0002202
9	0.9397202	4.6375E-05	0.0007233	0.001213	0.0007112	0.0002315
10	0.9343605	4.5682E-05	0.0007696	0.0012625	0.0007458	0.0002436
11	0.9335498	4.5435E-05	0.0007739	0.0012681	0.0007489	0.0002446
12	0.9321254	4.5005E-05	0.0007827	0.0012791	0.0007552	0.0002468
13	0.9264998	4.6028E-05	0.0008569	0.0013623	0.0008116	0.0002685
14	0.9244775	4.8065E-05	0.0009022	0.0014127	0.0008467	0.0002826
15	0.9231871	4.9574E-05	0.000937	0.0014538	0.0008735	0.0002938
16	0.9219116	5.1221E-05	0.0009741	0.0014995	0.0009022	0.0003061
17	0.9201855	5.9253E-05	0.00109	0.0016408	0.0009942	0.0003472
18	0.9196146	6.1939E-05	0.0011302	0.0016929	0.0010258	0.0003615
19	0.9967666	4.5357E-05	0.0005826	0.0010979	0.0006093	0.0002146
20	0.9935792	4.8102E-05	0.0005926	0.0010875	0.0006052	0.0002242
21	0.9929812	5.3634E-05	0.0006199	0.0010857	0.0006045	0.000235
22	0.9925037	6.7951E-05	0.0006994	0.001085	0.0006042	0.0002645
23	0.9808461	3.9621E-05	0.000581	0.0010955	0.0006097	0.0002084
24	0.9747266	3.9304E-05	0.000576	0.0010858	0.0006042	0.0002029
25	0.9716772	3.9147E-05	0.0005735	0.0010809	0.0006015	0.0002002
26	0.9512699	5.2646E-05	0.000628	0.00112	0.0006398	0.0002095
27	0.9488393	5.7335E-05	0.000628	0.0011155	0.000638	0.0002085
28	0.9383793	5.6641E-05	0.00062	0.001101	0.0006296	0.0002003
29	0.9308648	5.6156E-05	0.0006145	0.001091	0.0006238	0.0001946
30	0.9276183	5.5987E-05	0.0006126	0.0010878	0.000622	0.0001927

Número de Barra	Fund.	h =3	h=5	h=7	h = 9	h = 11
	Vbarra	Vbarra3	Vbarra5	Vbarra7	Vbarra9	Vbarra11
31	0.9238163	5.5665E-05	0.0006087	0.0010806	0.0006178	0.0001887
32	0.9229799	5.5589E-05	0.0006078	0.0010789	0.0006168	0.0001877
33	0.9227207	5.5567E-05	0.0006076	0.0010784	0.0006165	0.0001874

En la Cuadro 17 se muestran los resultados de tensión en el caso de estudio 3, se hace evidente una reducción en la tensión fundamental para algunas barras al igual que en el caso anterior, debido a que el sistema no contaba con muy buena regulación.

Cuadro 18. Resultados de corriente ramal caso de estudio 3

Rama		Fund.	h =3	h=5	h=7	h = 9	h = 11
		Iramal	Iramal3	Iramal5	Iramal7	Iramal9	Iramal11
1	2	0.46508576	0.00033858	0.0011103	6.9397E-05	0.00013557	0.00015722
2	3	0.41417573	0.00022076	0.0005498	2.8025E-05	0.00011098	6.505E-05
3	4	0.29904224	0.00021933	0.0005488	5.6034E-05	0.00011531	5.9898E-05
4	5	0.28428413	0.00021928	0.0005492	5.9604E-05	0.00011603	5.9659E-05
5	6	0.27743869	0.00021928	0.0005494	6.178E-05	0.00011643	5.9514E-05
6	7	0.12888761	4.0403E-05	0.000194	0.00020409	8.0048E-05	2.4109E-05
7	8	0.10539484	4.003E-05	0.0002007	0.00021033	8.3996E-05	2.6021E-05
8	9	0.08181491	3.97E-05	0.0002076	0.00021697	8.8051E-05	2.826E-05
9	10	0.07509499	3.9574E-05	0.0002102	0.00022005	8.9695E-05	2.9175E-05
10	11	0.06833799	3.9477E-05	0.0002131	0.00022337	9.1443E-05	3.0192E-05
11	12	0.06267598	3.9466E-05	0.0002147	0.00022489	9.2358E-05	3.0785E-05
12	13	0.05533579	3.9447E-05	0.000217	0.00022713	9.3659E-05	3.1631E-05
13	14	0.04798908	3.9468E-05	0.0002196	0.00022965	9.5074E-05	3.257E-05
14	15	0.03325953	3.9579E-05	0.0002249	0.00023468	9.789E-05	3.4496E-05
15	16	0.02667172	3.9483E-05	0.000229	0.00024151	0.00010099	3.6375E-05
16	17	0.01989811	3.9511E-05	0.0002328	0.00024589	0.00010318	3.7891E-05
17	18	0.01320548	3.9599E-05	0.000237	0.0002508	0.0001056	3.96E-05
2	19	0.04025408	0.00011881	0.000568	9.5853E-05	2.7808E-05	9.3143E-05
19	20	0.03043817	0.00011866	0.0005671	9.4448E-05	2.7216E-05	9.2846E-05
20	21	0.02065603	0.0001187	0.0005672	9.333E-05	2.6755E-05	9.2607E-05
21	22	0.01110356	0.0001188	0.0005676	9.24E-05	2.64E-05	9.24E-05

Rama		Fund.	h =3	h=5	h=7	h = 9	h = 11
		Iramal	Iramal3	Iramal5	Iramal7	Iramal9	Iramal11
3	23	0.10607888	2.6964E-06	2.662E-05	3.7207E-05	1.6367E-05	1.3505E-05
23	24	0.09559974	2.4474E-06	2.421E-05	3.387E-05	1.4904E-05	1.23E-05
24	25	0.04787476	1.2251E-06	1.212E-05	1.695E-05	7.4586E-06	6.1552E-06
6	26	0.14697471	0.0002075	0.0004848	0.00014666	9.4825E-05	4.2481E-05
26	27	0.14068355	0.00020767	0.0004846	0.00014505	9.4424E-05	4.203E-05
27	28	0.12996531	4.0455E-06	2.923E-05	3.8294E-05	1.7279E-05	1.4246E-05
28	29	0.12416194	3.7624E-06	2.689E-05	3.5076E-05	1.5791E-05	1.3003E-05
29	30	0.1102159	3.2492E-06	2.32E-05	3.0264E-05	1.3626E-05	1.1221E-05
30	31	0.05086154	1.907E-06	1.402E-05	1.8439E-05	8.3311E-06	6.8731E-06
31	32	0.03295384	1.2148E-06	8.887E-06	1.167E-05	5.2686E-06	4.3449E-06
32	33	0.00781504	2.5295E-07	1.777E-06	2.3001E-06	1.0317E-06	8.4795E-07

En la Cuadro 18 se muestran los resultados en corriente en el caso de estudio 3, el armónico con corriente más alta es el quinto en la rama 1 a 2, los resultados obtenidos, evidencian un incremento de las componentes armónicas debido cambio de modalidad de carga en el convertidor DC/DC, de igual manera se evidenció un aumento en el armónico 3 con respecto a los casos anteriores.

3.1.4. Caso 4. En este caso se encuentra 1 estación conectada en la barra 2, en el sistema de 11 barras, con el fin de obtener datos de tensión y corriente del sistema y comparar los resultados obtenidos.

Cuadro 19. Resultados de tensiones nodales en el caso de estudio 4

Nodos	fases	Fund.	h =3	h=5	h=7	h = 9	h = 11
		Vbarra	Vbarra3	Vbarra5	Vbarra7	Vbarra9	Vbarra11
2	a	1.0000	5.9801E-05	0.0009017	0.0009478	0.000263	0.0001301
	b	1.0000	5.2704E-05	0.0008893	0.0009398	0.000268	0.0001404
	c	1.0000	5.2303E-05	0.0008333	0.0009329	0.000263	0.0001497
3	a	0.9998639	4.6952E-05	0.0006867	0.0007271	0.000204	0.0001043
	b	0.9998706	4.9701E-05	0.0007326	0.0007779	0.000218	0.0001118
	c	0.9998702	4.9622E-05	0.0007313	0.0007764	0.000218	0.0001116

Nodos	fases	Fund.	h = 3	h = 5	h = 7	h = 9	h = 11
		Vbarra	Vbarra3	Vbarra5	Vbarra7	Vbarra9	Vbarra11
4	b	0.9997636	5.8318E-05	0.0008687	0.0009255	0.00026	0.0001333
	c	0.999978	5.8332E-05	0.0008689	0.0009257	0.00026	0.0001333
5	b	0.9999592	5.8338E-05	0.000869	0.0009259	0.00026	0.0001334
	c	0.9998571	5.833E-05	0.0008689	0.0009258	0.00026	0.0001333
6	a	0.9977421	5.8127E-05	0.0008657	0.0009223	0.000259	0.0001328
	b	0.9980436	5.8137E-05	0.0008658	0.0009224	0.000259	0.0001329
	c	0.9974865	5.8086E-05	0.000865	0.0009215	0.000259	0.0001327
7	a	0.9996949	5.8313E-05	0.0008686	0.0009254	0.00026	0.0001333
	b	0.9998917	5.8328E-05	0.0008689	0.0009257	0.00026	0.0001333
	c	0.9997522	5.832E-05	0.0008687	0.0009256	0.00026	0.0001333
8	a	1	5.8333E-05	0.0008689	0.0009258	0.00026	0.0001333
	c	0.999978	5.8332E-05	0.0008689	0.0009257	0.00026	0.0001333
9	c	0.9998252	5.832E-05	0.0008687	0.0009255	0.00026	0.0001333
10	a	1	5.8333E-05	0.0008689	0.0009258	0.00026	0.0001333
	b	0.999978	5.8332E-05	0.0008689	0.0009257	0.00026	0.0001333
	c	0.999978	5.8332E-05	0.0008689	0.0009257	0.00026	0.0001333
11	c	0.9998669	5.8324E-05	0.0008688	0.0009256	0.00026	0.0001333

En la Cuadro 19 se muestran los resultados de tensión en el caso de estudio 4, no se aprecian caídas de tensión en las barras de este sistema a frecuencia fundamental, el mayor aporte armónico está en el séptimo en la fase a.

Cuadro 20. Resultados de corrientes nodales en el caso de estudio 4

Nodos	fases	Fund.	h = 3	h = 5	h = 7	h = 9	h = 11
		Ibarra	Ibarra3	Ibarra5	Ibarra7	Ibarra9	Ibarra11
2	a	0.0044284	0.0000528	0.0003696	0.0002244	0.0000396	0.0000132
	b	0.0043188	0.000132	0.0004356	0.000132	0.000066	0.0000792
	c	0.0043292	0.0000924	0.0003168	0.000198	0.000066	0.000066
3	a	0.0194191	5.9981E-07	5.721E-06	4.439E-06	9.7711E-07	4.12E-07
	b	0.0150019	4.4433E-07	4.199E-06	3.249E-06	7.1419E-07	3.009E-07
	c	0.0150019	4.4433E-07	4.199E-06	3.249E-06	7.1419E-07	3.009E-07
4	b	0.0211059	6.3112E-07	5.976E-06	4.627E-06	1.0174E-06	4.287E-07
	c	0	0	0	0	0	0

Nodos	fases	Fund.	h =3	h=5	h=7	h = 9	h = 11
		lbarra	lbarra3	lbarra5	lbarra7	lbarra9	lbarra11
5	b	0.0210987	6.3082E-07	5.973E-06	4.624E-06	1.0169E-06	4.285E-07
	c	0.0210987	6.3082E-07	5.973E-06	4.624E-06	1.0169E-06	4.285E-07
6	a	0.0967209	3.1736E-06	3.092E-05	2.419E-05	5.3461E-06	2.259E-06
	b	0.0836819	2.8376E-06	2.771E-05	2.167E-05	4.7872E-06	2.022E-06
	c	0.1113049	3.6235E-06	3.502E-05	2.728E-05	6.0138E-06	2.537E-06
7	a	0.0622544	2.4256E-06	2.526E-05	2.026E-05	4.5276E-06	1.924E-06
	b	0.0268774	6.2847E-07	5.766E-06	4.422E-06	9.6845E-07	4.073E-07
	c	0.0503954	1.4405E-06	1.359E-05	1.051E-05	2.3111E-06	9.737E-07
8	a	0	0	0	0	0	0
	c	0	0	0	0	0	0
9	c	0.0247632	8.6643E-07	8.687E-06	6.863E-06	1.5229E-06	6.448E-07
10	a	0	0	0	0	0	0
	b	0	0	0	0	0	0
	c	0	0	0	0	0	0
11	c	0.0154187	4.8164E-07	4.606E-06	3.577E-06	7.8765E-07	3.321E-07

En la Cuadro 20 se muestran los resultados en corriente nodal en el caso de estudio 4, el armónico con corriente más alta es el quinto en el nodo 2, fase b, se aprecia más detalladamente la inyección de corrientes armónicas al ser realizado por fase en la barra 2.

Cuadro 21. Resultados de corrientes ramales en el caso de estudio 4

Ramas	fases	Fund.	h =3	h=5	h=7	h = 9	h = 11	
		lramal	lramal3	lramal5	lramal7	lramal9	lramal11	
1	2	a	0.160742	5.178E-05	0.000328	0.000204	3.604E-05	1.72E-05
		b	0.146666	0.000135	0.000421	0.000118	6.154E-05	7.9E-05
		c	0.222181	9.812E-05	0.000376	0.000191	6.494E-05	6.18E-05
2	3	a	0.019419	5.998E-07	5.72E-06	4.44E-06	9.771E-07	4.12E-07
		b	0.015002	4.443E-07	4.2E-06	3.25E-06	7.142E-07	3.01E-07
		c	0.015002	4.443E-07	4.2E-06	3.25E-06	7.142E-07	3.01E-07
2	4	b	0.034003	5.21E-07	3.14E-06	1.76E-06	3.039E-07	1.05E-07
		c	0.021099	6.308E-07	5.97E-06	4.62E-06	1.017E-06	4.28E-07
4	5	b	0.021099	6.308E-07	5.97E-06	4.62E-06	1.017E-06	4.28E-07

Ramaz	fases	Fund.	h =3	h=5	h=7	h = 9	h = 11	
		Iramal	Iramal3	Iramal5	Iramal7	Iramal9	Iramal11	
	c	0.021099	6.308E-07	5.97E-06	4.62E-06	1.017E-06	4.28E-07	
2	6	a	0.140962	4.881E-06	4.85E-05	3.84E-05	8.549E-06	3.63E-06
		b	0.109541	3.464E-06	3.33E-05	2.59E-05	5.71E-06	2.41E-06
		c	0.186291	5.878E-06	5.66E-05	4.41E-05	9.712E-06	4.1E-06
6	7	a	0.062254	2.426E-06	2.53E-05	2.03E-05	4.528E-06	1.92E-06
		b	0.026877	6.285E-07	5.77E-06	4.42E-06	9.685E-07	4.07E-07
		c	0.050395	1.441E-06	1.36E-05	1.05E-05	2.311E-06	9.74E-07
6	8	a	0.015419	4.816E-07	4.61E-06	3.58E-06	7.876E-07	3.32E-07
		c	0.024763	8.664E-07	8.69E-06	6.86E-06	1.523E-06	6.45E-07
8	9	c	0.024763	8.664E-07	8.69E-06	6.86E-06	1.523E-06	6.45E-07
6	10	a	0	0	0	0	0	0
		b	0	0	0	0	0	0
		c	0	0	0	0	0	0
8	11	c	0.015419	4.816E-07	4.61E-06	3.58E-06	7.876E-07	3.32E-07

En la Cuadro 21 se muestran los resultados en corriente ramal en el caso de estudio 4, el armónico con corriente más alta es el quinto en la rama 1 a 2, fase b, de igual manera se aprecia que en esta fase el tercer armónico proporciona más distorsiones a la red, en comparación del séptimo, noveno y onceavo.

3.1.5. Caso 5. En este caso se encuentra 1 estación conectada finalizando la carga en la barra 2, en el sistema de 11 barras.

Cuadro 22. Resultados de tensiones nodales en el caso de estudio 5

Nodos	fases	Fund.	h=3	h=5	h=7	h=9	h=11
		Vbarra	Vbarra3	Vbarra5	Vbarra7	Vbarra9	Vbarra11
2	a	1.0000	0.00014456	0.001319	0.000374	0.0001585	0.00061
	b	1.0000	0.00014481	0.001357	0.000379	0.0001603	0.000596
	c	1.0000	0.00015077	0.001256	0.000376	0.000157	0.000627
3	a	0.9999	0.00015224	0.00132	0.00036	0.0001628	0.000611
	b	0.9999	0.00015224	0.00132	0.00036	0.0001629	0.000611

Nodos	fases	Fund.	h=3	h=5	h=7	h=9	h=11
		Vbarra	Vbarra3	Vbarra5	Vbarra7	Vbarra9	Vbarra11
4	c	0.9999	0.00015224	0.00132	0.00036	0.0001628	0.000611
	b	0.9998	0.00015223	0.00132	0.00036	0.0001628	0.000611
	c	1.0000	0.00015227	0.00132	0.00036	0.0001629	0.000611
5	b	1.0000	0.00015228	0.001321	0.00036	0.0001629	0.000611
	c	0.9999	0.00015226	0.00132	0.00036	0.0001629	0.000611
6	a	0.9977	0.00015173	0.001316	0.000359	0.0001623	0.000609
	b	0.9980	0.00015176	0.001316	0.000359	0.0001623	0.000609
	c	0.9975	0.00015162	0.001314	0.000358	0.0001621	0.000609
7	a	0.9997	0.00015222	0.00132	0.00036	0.0001628	0.000611
	b	0.9999	0.00015225	0.00132	0.00036	0.0001629	0.000611
	c	0.9998	0.00015224	0.00132	0.00036	0.0001628	0.000611
8	a	1.0000	0.00015227	0.00132	0.00036	0.0001629	0.000611
	c	1.0000	0.00015227	0.00132	0.00036	0.0001629	0.000611
9	c	0.9998	0.00015224	0.00132	0.00036	0.0001628	0.000611
10	a	1.0000	0.00015227	0.00132	0.00036	0.0001629	0.000611
	b	1.0000	0.00015227	0.00132	0.00036	0.0001629	0.000611
	c	1.0000	0.00015227	0.00132	0.00036	0.0001629	0.000611
11	c	0.9999	0.00015224	0.00132	0.00036	0.0001629	0.000611

En la Cuadro 22 se muestran los resultados de tensión en el caso de estudio 5, no se aprecian caídas de tensión en las barras de este sistema a frecuencia fundamental, las tensiones del quinto armónico en el nodo 2 son 10 veces mayores con respecto al tercer armónico

Cuadro 23. Resultados de corrientes nodales en el caso de estudio 5

Nodos	fases	Fund.	h = 3	h = 5	h = 7	h = 9	h = 11
		Ibarra	Ibarra3	Ibarra5	Ibarra7	Ibarra9	Ibarra11
2	a	0.0037014	0.0001188	0.0005676	0.0000924	0.0000264	0.0000924
	b	0.0037338	0.000132	0.0004092	0.0001188	0.0000264	0.000066
	c	0.0036498	0.0000264	0.000594	0.0001056	0.0000396	0.000066
3	a	0.0194191	1.566E-06	8.693E-06	1.726E-06	6.1248E-07	1.889E-06

Nodos	fases	Fund.	h = 3	h = 5	h = 7	h = 9	h = 11
		Ibarra	Ibarra3	Ibarra5	Ibarra7	Ibarra9	Ibarra11
	b	0.0150019	1.16E-06	6.381E-06	1.263E-06	4.4768E-07	1.38E-06
	c	0.0150019	1.16E-06	6.381E-06	1.263E-06	4.4768E-07	1.38E-06
4	b	0.0211059	1.647E-06	9.081E-06	1.798E-06	6.3771E-07	1.966E-06
	c	0	0	0	0	0	0
5	b	0.0210987	1.647E-06	9.077E-06	1.798E-06	6.3741E-07	1.965E-06
	c	0.0210987	1.647E-06	9.077E-06	1.798E-06	6.3741E-07	1.965E-06
6	a	0.0967209	8.284E-06	4.699E-05	9.403E-06	3.3511E-06	1.036E-05
	b	0.0836819	7.407E-06	4.211E-05	8.424E-06	3.0007E-06	9.271E-06
	c	0.1113049	9.459E-06	5.321E-05	1.06E-05	3.7696E-06	1.163E-05
7	a	0.0622544	6.332E-06	3.839E-05	7.876E-06	2.838E-06	8.823E-06
	b	0.0268774	1.641E-06	8.761E-06	1.719E-06	6.0705E-07	1.867E-06
	c	0.0503954	3.76E-06	2.066E-05	4.087E-06	1.4487E-06	4.465E-06
8	a	0	0	0	0	0	0
	c	0	0	0	0	0	0
9	c	0.0247632	2.262E-06	1.32E-05	2.668E-06	9.5457E-07	2.956E-06
10	a	0	0	0	0	0	0
	b	0	0	0	0	0	0
	c	0	0	0	0	0	0
11	c	0.0154187	1.257E-06	6.999E-06	1.39E-06	4.9372E-07	1.523E-06

En la Cuadro 23 se muestran los resultados en corriente nodal en el caso de estudio 5, el armónico con corriente más alta es el quinto en el nodo 2, fase c, el tercer armónico es mayor con respecto al séptimo, noveno y onceavo en la fase a.

Cuadro 24. Resultados de corrientes ramales en el caso de estudio 5

Ramas	fases	Fund.	h = 3	h = 5	h = 7	h = 9	h = 11	
		Iramal	Iramal3	Iramal5	Iramal7	Iramal9	Iramal11	
1	2	a	0.16068	1.33E-04	0.00057719	7.6361E-05	3.1122E-05	9.2521E-05
	b	0.14618	1.40E-04	0.00036596	0.00010791	2.798E-05	7.8113E-05	
	c	0.22164	3.99E-05	0.00068429	8.8181E-05	4.4472E-05	4.8138E-05	
2	3	a	0.01942	1.57E-06	8.6932E-06	1.7255E-06	6.1248E-07	1.8889E-06
	b	0.015	1.16E-06	6.381E-06	1.2628E-06	4.4768E-07	1.3797E-06	

Ramas	fases	Fund.	h = 3	h = 5	h = 7	h = 9	h = 11	
		Iramal	Iramal3	Iramal5	Iramal7	Iramal9	Iramal11	
	c	0.015	1.16E-06	6.381E-06	1.2628E-06	4.4768E-07	1.3797E-06	
2	4	b	0.034	1.36E-06	4.7659E-06	6.8581E-07	1.9052E-07	4.8227E-07
		c	0.0211	1.65E-06	9.0771E-06	1.7975E-06	6.3741E-07	1.9647E-06
4	5	b	0.0211	1.65E-06	9.0771E-06	1.7975E-06	6.3741E-07	1.9647E-06
		c	0.0211	1.65E-06	9.0771E-06	1.7975E-06	6.3741E-07	1.9647E-06
2	6	a	0.14096	1.27E-05	7.3644E-05	1.4923E-05	5.3585E-06	1.6643E-05
		b	0.10954	9.04E-06	5.0676E-05	1.008E-05	3.5793E-06	1.1037E-05
		c	0.18629	1.53E-05	8.605E-05	1.7132E-05	6.0875E-06	1.8781E-05
6	7	a	0.06225	6.33E-06	3.8392E-05	7.8756E-06	2.838E-06	8.823E-06
		b	0.02688	1.64E-06	8.7614E-06	1.7188E-06	6.0705E-07	1.8674E-06
		c	0.0504	3.76E-06	2.0657E-05	4.087E-06	1.4487E-06	4.4646E-06
6	8	a	0.01542	1.26E-06	6.9989E-06	1.3904E-06	4.9372E-07	1.5229E-06
		c	0.02476	2.26E-06	1.32E-05	2.6676E-06	9.5457E-07	2.9565E-06
8	9	c	0.02476	2.26E-06	1.32E-05	2.6676E-06	9.5457E-07	2.9565E-06
6	10	a	0	0.00E+00	0	0	0	0
		b	0	0.00E+00	0	0	0	0
		c	0	0.00E+00	0	0	0	0
8	11	c	0.01542	1.26E-06	6.9989E-06	1.3904E-06	4.9372E-07	1.5229E-06

En la Cuadro 24 se aprecia que la mayor inyección de corriente la presenta el quinto armónico, aunque se pueden evidenciar desbalances en las corrientes de la rama 1 y 2.

3.2. NORMATIVA PARA LA INSTALACIÓN ADECUADA DE ESTACIONES DE VE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

La regulación y normativa de referencia para la instalación de estaciones de recarga en Colombia contempla:

- Reglamento técnico de instalaciones eléctricas RETIE. Capítulo 3, artículo 20.7.

- Norma técnica colombiana NTC 2050. Capítulo 6, sección 625.
- Norma técnica EPM. Instalación de estaciones de carga para vehículos eléctricos.
- IEC 61851-1. Sistema conductivo de carga para vehículos eléctricos, parte 1. Requisitos generales.
- IEC 61851-22. Sistema conductivo de carga para vehículos eléctricos, parte 22. Estación en corriente alterna para vehículos eléctricos.

Las normativas mencionadas anteriormente establecen los requisitos mínimos que debe cumplir cada estación teniendo en cuenta su modalidad de carga, estos son: elección de acometida, selección de protecciones, protocolo de comunicación, nivel de tensión etc. Estas condiciones rigen a nivel regional (OR), nacional e internacional^{46 47 48 49 50}.

- IEC 61000-3-2. Compatibilidad electromagnética (CEM) parte 3-2. Límites para las emisiones de corriente armónica.

Define los límites de las emisiones de corrientes armónicas, para equipos que requieran una corriente de entrada menor o igual a 16 [A] por fase⁵¹.

- IEEE 519. Prácticas recomendadas y requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos.

⁴⁶ ICONTEC Op. Cit.

⁴⁷ EPM, *Norma Técnica: Instalación de Estaciones de Carga para Vehículos Eléctricos*, 2019

⁴⁸ MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas. RETIE*, 2013

⁴⁹ COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL, *IEC 618151-22.Sistema conductivo de carga para vehículos eléctricos. Parte 22: Estaciones de carga en c.a para vehículos eléctricos*, AENOR, 2002.

⁵⁰ COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL, *IEC 618151-1.Sistema conductivo de carga para vehículos eléctricos. Parte 1. Requisitos Generales*, AENOR, 2020

⁵¹ COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL, *IEC 61000-3-2. Compatibilidad electromagnética. Parte 3-2. Límites para las emisiones de corriente armónica.*, AENOR, 2019

- Estándar IEEE 1459. Definiciones para la medida de cantidades de potencia eléctrica bajo condiciones sinusoidales, no sinusoidales, balanceadas y desbalanceadas.

Estos estándares definen y clasifican los cálculos de potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente para sistemas sinusoidales, no sinusoidales con componentes armónica, sistemas balanceados, desbalanceados y los límites armónicos que se permiten ingresar a la red, según el THD y las distorsión armónica individual^{52 53}.

3.3. MODELAMIENTO Y ANÁLISIS DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Conocer el estado y la disposición del sistema de distribución, es un requisito previo a la incorporación de la estación de carga.

Dicho estado se determina a través del estudio de la red tipo. Las diferentes topologías de los SDEE permiten su modelamiento al encontrar los parámetros de este mediante ecuaciones o modelos matemáticos y datos suministrados por los proveedores o diseñadores de los elementos del sistema.

En el estudio se escogieron dos redes de prueba planteadas por el IEEE las cuales fueron levemente modificadas para ajustarlas a las condiciones de los casos, finalmente modelar las cargas para observar el comportamiento general del sistema antes y después de la incorporación de cargas no lineales.

⁵² IEEE POWER & ENERGY SOCIETY, *IEEE Standard 1459. Definitions for the Measurement of Electric Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions*, IEEE, 2010.

⁵³ IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, *IEEE Standard. 519. Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, Nueva York, 2014.

3.4. MODELAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA ESTACIÓN DE CARGA QUE SERÁ CONECTADA AL SISTEMA

La estación empleada mostrada en la Figura 14 Pertenece a un modelo conformado por dos convertidores, un convertidor AC/DC con un filtro LCL incorporado pretendiendo mitigar armónicos y un convertidor DC/DC encargado de proveerle la energía al VE, a esta estación se le realizó un estudio de tensiones y corrientes armónicas en el programa MATLAB el cual tiene el fin de recopilar datos para incorporarlos en el estudio de la red de distribución tipo. Debido a que este no es el único modelo de estación que se encuentra en el mercado se considera necesario un estudio por modelo de estación que recopile datos de tensiones y corrientes al igual que en el expuesto en el caso de estudio mostrado anteriormente, con el propósito de planear adecuadamente su incorporación en un sistema de distribución real.

3.5. SIMULACIÓN DEL SISTEMA DESPUÉS DE LA INCORPORACIÓN DE LAS ESTACIONES

Con los datos obtenidos en las simulaciones de los sistemas sin estaciones conectadas se procede a:

1. Incorporar una estación a la red tipo. En los casos de estudios 1 y 4 se propone conectar la estación en el nodo más cercano a la subestación buscando disminuir las pérdidas de potencia, para este modelo en particular corresponde a la barra 2 Figura 21 y Figura 20, debido a que no es posible conectarla en la misma barra del transformador.

2. Se procede a incrementar el número de estaciones conectadas, con el propósito de visualizar si aumentan los armónicos con respecto al caso anterior, y revisar si los datos obtenidos, cumplen con lo estipulado por la normativa.

3. En los resultados del análisis realizado a las estaciones de carga se notaron unos incrementos de las componentes armónicas cuando estas llegaban al final del proceso, causado por el convertidor DC/DC en el momento en que variaba de corriente constante a tensión constante. Debido a esto se propone para el caso de estudio 3 hacer el flujo de potencia del sistema cuando dos estaciones se encuentran al final de su carga y la otra al inicio.

3.6. CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE DISTORSIÓN ARMÓNICA

Con el fin de evidenciar la respuesta del sistema ante las diversas incorporaciones de EV, se realizaron los cálculos de distorsión armónica total en tensión, corriente ramal, corriente nodal y la distorsión por armónico individual de cada caso de estudio.

a. Cálculo de THD (%) en los casos de estudio 1, 2 y 3.

Cuadro 25. Resultados THDv de las barras en el SDEE de 33 barras a partir de los casos de estudio

Número de Barra	Caso 1	Caso 2	Caso 3
	THDv en barras (%)	THDv en barras (%)	THDv en barras (%)
1	0.1407	0.1407	0.1407
2	0.1412	0.142	0.1409
3	0.1411	0.1466	0.1427
4	0.141	0.1501	0.1442
5	0.141	0.1539	0.1459

Número de Barra	Caso 1	Caso 2	Caso 3
	THDv en barras (%)	THDv en barras (%)	THDv en barras (%)
6	0.1399	0.1663	0.1526
7	0.1388	0.1707	0.158
8	0.1389	0.1736	0.1614
9	0.1385	0.1809	0.1701
10	0.1381	0.1885	0.1792
11	0.1381	0.1893	0.1802
12	0.1381	0.191	0.1821
13	0.1376	0.2032	0.1968
14	0.1372	0.2104	0.2055
15	0.137	0.2161	0.2124
16	0.1368	0.2223	0.2198
17	0.1364	0.2414	0.2428
18	0.1364	0.2483	0.251
19	0.1411	0.1433	0.1406
20	0.1408	0.1556	0.1406
21	0.1407	0.16	0.1419
22	0.1406	0.1688	0.1462
23	0.1409	0.1464	0.1425
24	0.1405	0.146	0.1421
25	0.1403	0.1457	0.1419
26	0.1399	0.1674	0.1525
27	0.1399	0.1691	0.1525
28	0.1396	0.1686	0.1521
29	0.1394	0.1684	0.1518
30	0.1394	0.1685	0.1519
31	0.139	0.168	0.1515
32	0.1389	0.1679	0.1514
33	0.1389	0.1679	0.1514

Se evidencia un leve aumento de distorsión en el caso 2, siendo este un poco mayor que los otros dos casos, el caso que menos distorsiones presenta es el caso 1, dejando claro nuevamente que más estaciones implican más armónicos, el caso de

estudio 3 muestra que al ir finalizando la carga de los VE se reducen los armónicos en tensión.

Cuadro 26. Resultados THDi en las ramas del SDEE de 33 barras a partir de los casos de estudio

Rama		Caso 1	Caso 2	Caso 3
		THDi en ramas (%)	THDi en ramas (%)	THDi en ramas (%)
1	2	0.0427	0.1653	0.254
2	3	0.0457	0.1121	0.1465
3	4	0.0448	0.1707	0.2032
4	5	0.0451	0.1815	0.2141
5	6	0.0451	0.1871	0.2195
6	7	0.0494	0.1964	0.23
7	8	0.0503	0.2537	0.2907
8	9	0.0518	0.3479	0.3871
9	10	0.0509	0.3886	0.4275
10	11	0.0498	0.4387	0.4767
11	12	0.051	0.4876	0.5236
12	13	0.0525	0.5685	0.5994
13	14	0.0545	0.6792	0.6994
14	15	0.0632	1.0882	1.0327
15	16	0.0553	1.4854	1.3195
16	17	0.0533	2.2903	1.8
17	18	0.0488	4.7242	2.7652
2	19	0.0502	0.84	1.4809
19	20	0.0501	1.1785	1.9545
20	21	0.0501	1.9425	2.8795
21	22	0.0501	5.0733	5.359
3	23	0.0472	0.0491	0.0476
23	24	0.0476	0.0496	0.0481
24	25	0.0476	0.0496	0.0481
6	26	0.0392	0.1849	0.379
26	27	0.0384	0.1961	0.3955
27	28	0.0375	0.0457	0.041
28	29	0.036	0.0439	0.0393

Rama		Caso 1	Caso 2	Caso 3
		THDi en ramas (%)	THDi en ramas (%)	THDi en ramas (%)
29	30	0.035	0.0426	0.0382
30	31	0.0461	0.0562	0.0504
31	32	0.045	0.0549	0.0492
32	33	0.0375	0.0458	0.0411

Se evidencia que la estación que inicia su carga y está cercana a las ramas 17 a 18 en el caso 2 distorsiona significativamente la corriente total, probablemente porque en ese caso hay varias estaciones iniciando su carga, la rama 21 a 22 del caso 3 presenta la distorsión armónica más elevada, sugiriendo que el cambio de corriente constante a tensión constante influye en el incremento de armónicos, la rama 27 a 28 presentan casi la misma distorsión en el caso 2 y 3.

Cuadro 27. Resultados THDi individual en las ramas del SDEE de 33 barras a partir de los casos de estudio

Rama		DISTORSIÓN ARMÓNICA INDIVIDUAL POR RAMA								
		Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 1	Caso 2	Caso 3
		THDi3 (%)	THDi3 (%)	THDi3 (%)	THDi5 (%)	THDi5 (%)	THDi5 (%)	THDi7 (%)	THDi7 (%)	THDi7 (%)
1	2	0.0083	0.0192	0.0728	0.021	0.1035	0.2387	0.0352	0.1218	0.0149
2	3	0.0029	0.0146	0.0533	0.0242	0.0691	0.1328	0.0335	0.0837	0.0068
3	4	0.0028	0.0195	0.0733	0.0237	0.1071	0.1835	0.0329	0.1254	0.0187
4	5	0.0028	0.0204	0.0771	0.0239	0.1141	0.1932	0.0332	0.1331	0.021
5	6	0.0028	0.0209	0.079	0.0238	0.1178	0.198	0.0331	0.1372	0.0223
6	7	0.003	0.0224	0.0313	0.026	0.1249	0.1505	0.0364	0.1427	0.1583
7	8	0.0031	0.0274	0.038	0.0263	0.162	0.1904	0.037	0.1836	0.1996
8	9	0.0031	0.0356	0.0485	0.0269	0.2228	0.2537	0.0381	0.2507	0.2652
9	10	0.0031	0.0389	0.0527	0.0265	0.2486	0.2799	0.0375	0.2799	0.293
10	11	0.003	0.0429	0.0578	0.0259	0.2805	0.3118	0.0367	0.316	0.3269
11	12	0.0031	0.0472	0.063	0.0265	0.3119	0.3426	0.0376	0.3509	0.3588
12	13	0.0031	0.0542	0.0713	0.0271	0.364	0.3922	0.0387	0.4086	0.4105
13	14	0.0032	0.0638	0.0822	0.028	0.4351	0.4577	0.0402	0.4876	0.4786
14	15	0.0035	0.0995	0.119	0.0321	0.6981	0.6761	0.0467	0.7792	0.7056
15	16	0.0033	0.1314	0.148	0.029	0.9463	0.8586	0.0407	1.0683	0.9055
16	17	0.0033	0.1983	0.1986	0.0281	1.4574	1.1698	0.0392	1.647	1.2357

17	18	0.0031	0.4003	0.2999	0.026	3.0025	1.7944	0.0358	3.3971	1.8992
2	19	0.0031	0.0763	0.2951	0.0266	0.5336	1.411	0.0368	0.606	0.2381
19	20	0.0031	0.1046	0.3898	0.0266	0.7489	1.863	0.0368	0.8493	0.3103
20	21	0.0031	0.1684	0.5746	0.0266	1.2345	2.7458	0.0368	1.3983	0.4518
21	22	0.0031	0.4299	1.0699	0.0266	3.2243	5.112	0.0368	3.6481	0.8322
3	23	0.003	0.0029	0.0025	0.0251	0.0266	0.0251	0.0346	0.0358	0.0351
23	24	0.003	0.0029	0.0026	0.0254	0.0268	0.0253	0.035	0.0362	0.0354
24	25	0.003	0.0029	0.0026	0.0253	0.0268	0.0253	0.0349	0.0361	0.0354
6	26	0.0026	0.0198	0.1412	0.0209	0.1153	0.3298	0.0287	0.1364	0.0998
26	27	0.0025	0.0206	0.1476	0.0205	0.1224	0.3444	0.0281	0.1445	0.1031
27	28	0.0025	0.002	0.0031	0.0201	0.0261	0.0225	0.0275	0.0325	0.0295
28	29	0.0024	0.0019	0.003	0.0193	0.0251	0.0217	0.0263	0.0311	0.0283
29	30	0.0023	0.0019	0.0029	0.0188	0.0244	0.0211	0.0256	0.0303	0.0275
30	31	0.003	0.0024	0.0037	0.0246	0.032	0.0276	0.0338	0.04	0.0363
31	32	0.0029	0.0023	0.0037	0.0241	0.0313	0.027	0.033	0.039	0.0354
32	33	0.0026	0.002	0.0032	0.0203	0.0264	0.0227	0.0274	0.0324	0.0294

Cuadro 28. Resultados THDi individual en las ramas del SDEE de 33 barras a partir de los casos de estudio

Rama		DISTORSIÓN ARMÓNICA INDIVIDUAL POR RAMA					
		Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 1	Caso 2	Caso 3
		THDi 9(%)	THDi 9(%)	THDi 9(%)	THDi11 (%)	THDi 11(%)	THDi11 (%)
1	2	0.0041	0.0364	0.0291	0.008	0.0095	0.0338
2	3	0.0148	0.0227	0.0268	0.0122	0.0077	0.0157
3	4	0.0145	0.0379	0.0386	0.012	0.0098	0.02
4	5	0.0146	0.0406	0.0408	0.0121	0.0104	0.021
5	6	0.0146	0.0421	0.042	0.0121	0.0108	0.0215
6	7	0.0161	0.0441	0.0621	0.0134	0.0121	0.0187
7	8	0.0165	0.0587	0.0797	0.0137	0.0155	0.0247
8	9	0.017	0.0826	0.1076	0.0142	0.0222	0.0345
9	10	0.0167	0.093	0.1194	0.014	0.0252	0.0389
10	11	0.0164	0.106	0.1338	0.0137	0.0292	0.0442
11	12	0.0168	0.1183	0.1474	0.0141	0.0331	0.0491
12	13	0.0173	0.1388	0.1693	0.0145	0.0395	0.0572
13	14	0.0181	0.1668	0.1981	0.0152	0.0485	0.0679
14	15	0.0211	0.2701	0.2943	0.0178	0.082	0.1037
15	16	0.018	0.3727	0.3786	0.0149	0.1167	0.1364
16	17	0.0173	0.5786	0.5185	0.0143	0.1868	0.1904
17	18	0.0157	1.2012	0.7997	0.013	0.4004	0.2999

Rama		DISTORSIÓN ARMÓNICA INDIVIDUAL POR RAMA					
		Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 1	Caso 2	Caso 3
		THDi 9(%)	THDi 9(%)	THDi 9(%)	THDi11 (%)	THDi 11(%)	THDi11 (%)
2	19	0.0162	0.2087	0.0691	0.0134	0.0646	0.2314
19	20	0.0162	0.2952	0.0894	0.0134	0.0935	0.305
20	21	0.0162	0.4903	0.1295	0.0134	0.1593	0.4483
21	22	0.0162	1.2899	0.2378	0.0134	0.4299	0.8322
3	23	0.0152	0.0157	0.0154	0.0125	0.013	0.0127
23	24	0.0153	0.0159	0.0156	0.0126	0.0131	0.0129
24	25	0.0153	0.0159	0.0156	0.0126	0.0131	0.0129
6	26	0.0126	0.0422	0.0645	0.0104	0.0103	0.0289
26	27	0.0123	0.0451	0.0671	0.0102	0.0111	0.0299
27	28	0.012	0.0145	0.0133	0.0099	0.0119	0.011
28	29	0.0115	0.0138	0.0127	0.0095	0.0114	0.0105
29	30	0.0112	0.0134	0.0124	0.0092	0.0111	0.0102
30	31	0.0148	0.0178	0.0164	0.0122	0.0147	0.0135
31	32	0.0144	0.0174	0.016	0.0119	0.0143	0.0132
32	33	0.0119	0.0144	0.0132	0.0098	0.0118	0.0109

En el estudio por armónico individual en corriente se evidencia que en el caso 3 en la rama 17 a 18 para los armónicos 5 y 7 se presentan distorsiones elevadas, aunque destaca principalmente el armónico 7 en el caso 2, se esperaba menos distorsión en el noveno armónico del segundo caso debido al delta del transformador., en el caso 2 se presenta un THD individual por rama mayor al del caso 3, debido a que la corriente fundamental en este caso disminuye con respecto al caso 2, probablemente causado porque la potencia consumida en ese instante de carga es menor en el caso 3.

Cuadro 29. Resultados THDv individual por nodo en el SDEE de 33 barras a partir de los casos de estudios

No. de Barra	DISTORSIÓN ARMÓNICA INDIVIDUAL DE TENSIÓN EN LAS BARRAS								
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 1	Caso 2	Caso 3
	THDv3 (%)	THDv3 (%)	THDv3 (%)	THDv5 (%)	THDv5 (%)	THDv5 (%)	THDv7 (%)	THDv7 (%)	THDv7 (%)
1	0.0048	0.0048	0.0048	0.0591	0.0591	0.0591	0.11	0.11	0.11
2	0.0048	0.0048	0.0046	0.0594	0.0599	0.0588	0.1103	0.1109	0.1102
3	0.0048	0.0046	0.004	0.0594	0.0627	0.0593	0.1103	0.1141	0.1118
4	0.0048	0.0044	0.0038	0.0594	0.0649	0.0598	0.1103	0.1166	0.113
5	0.0048	0.0043	0.0037	0.0594	0.0672	0.0606	0.1103	0.1192	0.1142
6	0.0048	0.0039	0.0052	0.059	0.0751	0.066	0.1095	0.1276	0.1179
7	0.0048	0.0038	0.0052	0.0587	0.0782	0.0698	0.1088	0.1304	0.1209
8	0.0048	0.0037	0.005	0.0587	0.0798	0.0717	0.1088	0.1326	0.1234
9	0.0048	0.0036	0.0049	0.0586	0.0841	0.077	0.1085	0.1377	0.1291
10	0.0048	0.0035	0.0049	0.0584	0.0886	0.0824	0.1083	0.1431	0.1351
11	0.0048	0.0035	0.0049	0.0585	0.089	0.0829	0.1083	0.1438	0.1358
12	0.0048	0.0034	0.0048	0.0585	0.0899	0.084	0.1083	0.145	0.1372
13	0.0048	0.0034	0.005	0.0583	0.0969	0.0925	0.1079	0.1538	0.147
14	0.0047	0.0035	0.0052	0.0582	0.1011	0.0976	0.1076	0.1589	0.1528
15	0.0047	0.0035	0.0054	0.0581	0.1043	0.1015	0.1075	0.163	0.1575
16	0.0047	0.0036	0.0056	0.058	0.1078	0.1057	0.1074	0.1675	0.1626
17	0.0047	0.0041	0.0064	0.0579	0.1183	0.1185	0.1071	0.1813	0.1783
18	0.0047	0.0042	0.0067	0.0579	0.122	0.1229	0.107	0.1864	0.1841
19	0.0048	0.0047	0.0046	0.0593	0.0608	0.0584	0.1103	0.1117	0.1101
20	0.0048	0.0043	0.0048	0.0592	0.0686	0.0596	0.11	0.1197	0.1094
21	0.0048	0.0042	0.0054	0.0592	0.0714	0.0624	0.11	0.1225	0.1093
22	0.0048	0.0041	0.0068	0.0592	0.0768	0.0705	0.1099	0.1284	0.1093
23	0.0048	0.0046	0.004	0.0593	0.0627	0.0592	0.1102	0.114	0.1117
24	0.0048	0.0046	0.004	0.0592	0.0625	0.0591	0.1099	0.1137	0.1114
25	0.0048	0.0046	0.004	0.0591	0.0625	0.059	0.1098	0.1135	0.1112
26	0.0048	0.0039	0.0055	0.059	0.0758	0.066	0.1096	0.1284	0.1177
27	0.0048	0.0038	0.006	0.0591	0.0767	0.0662	0.1096	0.1296	0.1176
28	0.0048	0.0038	0.006	0.0589	0.0766	0.0661	0.1094	0.1293	0.1173
29	0.0048	0.0038	0.006	0.0589	0.0765	0.066	0.1093	0.1292	0.1172
30	0.0048	0.0038	0.006	0.0589	0.0766	0.066	0.1093	0.1292	0.1173
31	0.0048	0.0038	0.006	0.0588	0.0764	0.0659	0.109	0.1289	0.117

No. de Barra	DISTORSIÓN ARMÓNICA INDIVIDUAL DE TENSIÓN EN LAS BARRAS								
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 1	Caso 2	Caso 3
	THDv3 (%)	THDv3 (%)	THDv3 (%)	THDv5 (%)	THDv5 (%)	THDv5 (%)	THDv7 (%)	THDv7 (%)	THDv7 (%)
32	0.0048	0.0038	0.006	0.0588	0.0764	0.0659	0.109	0.1288	0.1169
33	0.0048	0.0038	0.006	0.0587	0.0764	0.0658	0.1089	0.1288	0.1169

Cuadro 30. Resultados THDv individual por nodo en el SDEE de 33 barras a partir de los casos de estudio

Número de Barra	DISTORSIÓN ARMÓNICA INDIVIDUAL DE TENSIÓN EN LAS BARRAS					
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 1	Caso 2	Caso 3
	THDv 9(%)	THDv 9(%)	THDv 9(%)	THDv11 (%)	THDv11 (%)	THDv11 (%)
1	0.061	0.061	0.061	0.0217	0.0217	0.0217
2	0.0612	0.0615	0.0612	0.0217	0.0218	0.0216
3	0.0612	0.0635	0.0622	0.0211	0.0218	0.0214
4	0.0612	0.065	0.0631	0.0208	0.022	0.0215
5	0.0612	0.0666	0.0639	0.0206	0.0223	0.0215
6	0.0607	0.072	0.0673	0.0194	0.0231	0.0221
7	0.0602	0.074	0.0702	0.0188	0.0233	0.0229
8	0.0603	0.0751	0.0716	0.0186	0.0235	0.0233
9	0.0601	0.078	0.0757	0.0182	0.0242	0.0246
10	0.0599	0.0811	0.0798	0.0178	0.0249	0.0261
11	0.06	0.0814	0.0802	0.0177	0.025	0.0262
12	0.06	0.0819	0.081	0.0177	0.0251	0.0265
13	0.0597	0.0868	0.0876	0.0172	0.0265	0.029
14	0.0595	0.0897	0.0916	0.0169	0.0274	0.0306
15	0.0594	0.0919	0.0946	0.0167	0.0282	0.0318
16	0.0594	0.0943	0.0979	0.0166	0.0291	0.0332
17	0.0592	0.1018	0.108	0.0163	0.0319	0.0377
18	0.0592	0.1044	0.1115	0.0163	0.033	0.0393
19	0.0612	0.0622	0.0611	0.0216	0.022	0.0215
20	0.061	0.0677	0.0609	0.0213	0.0238	0.0226
21	0.061	0.0697	0.0609	0.0213	0.0245	0.0237
22	0.0609	0.0735	0.0609	0.0212	0.026	0.0266
23	0.0611	0.0634	0.0622	0.0209	0.0216	0.0212

Número de Barra	DISTORSIÓN ARMÓNICA INDIVIDUAL DE TENSIÓN EN LAS BARRAS					
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 1	Caso 2	Caso 3
	THDv 9(%)	THDv 9(%)	THDv 9(%)	THDv11 (%)	THDv11 (%)	THDv11 (%)
24	0.0609	0.0633	0.062	0.0205	0.0212	0.0208
25	0.0609	0.0632	0.0619	0.0203	0.021	0.0206
26	0.0607	0.0724	0.0673	0.0193	0.0232	0.022
27	0.0607	0.0731	0.0672	0.0192	0.0233	0.022
28	0.0606	0.0729	0.0671	0.0186	0.0226	0.0213
29	0.0605	0.0729	0.067	0.0182	0.0221	0.0209
30	0.0606	0.0729	0.067	0.0181	0.022	0.0208
31	0.0604	0.0727	0.0669	0.0178	0.0216	0.0204
32	0.0604	0.0727	0.0668	0.0177	0.0215	0.0203
33	0.0604	0.0726	0.0668	0.0177	0.0215	0.0203

Al igual que la corriente mostrada en la tabla anterior las distorsiones en tensión son más elevadas en el armónico 5 y el armónico 7 presentándose en la barra 18 cuando recién inicia la carga del vehículo, nuevamente el armónico 9 presenta distorsiones más elevadas de lo esperado.

b. Cálculo de THD (%) en los casos de estudio 4 y 5.

Cuadro 31. Resultados THD de las barras en el SDEE de 11 barras a partir de los casos de estudio

Nodos	fases	Caso 4		Caso 5	
		THDv (%)	THDi (%)	THDv (%)	THDi (%)
2	a	0.1342	9.88153	0.15156	16.07549
	b	0.13299	11.23006	0.15445	12.09775
	c	0.1288	9.14728	0.14693	16.67978
3	a	0.10271	0.03781	0.15153	0.04746
	b	0.10976	0.03589	0.15154	0.04509
	c	0.10955	0.03589	0.15154	0.04509
4	b	0.13041	0.03631	0.15154	0.04562
	c	0.13041	0	0.15154	0

Nodos	fases	Caso 4		Caso 5	
		THDv (%)	THDi (%)	THDv (%)	THDi (%)
5	b	0.13044	0.03631	0.15157	0.04561
	c	0.13043	0.03631	0.15157	0.04561
6	a	0.13023	0.04116	0.15133	0.05152
	b	0.1302	0.04263	0.1513	0.05336
	c	0.13015	0.04044	0.15124	0.05069
7	a	0.1304	0.05276	0.15153	0.06548
	b	0.13042	0.02741	0.15155	0.03456
	c	0.13042	0.03458	0.15155	0.04346
8	a	0.13041	0	0.15154	0
	c	0.13041	0	0.15154	0
9	c	0.1304	0.04534	0.15153	0.05655
10	a	0.13041	0	0.15154	0
	b	0.13041	0	0.15154	0
	c	0.13041	0	0.15154	0
11	c	0.13041	0.03835	0.15154	0.04813

Para estos casos se evidencia distorsión elevada en las corrientes de nodo, aunque los armónicos de la tensión se mantienen reducidos.

Cuadro 32. Resultados THDi de las ramas en el SDEE de 11 barras a partir de los casos de estudio

Ramas		Fases	Caso 4	Caso 5
			THDi (%)	THDi (%)
1	2	a	0.24368	0.37663
		b	0.31951	0.28376
		c	0.19912	0.31321
2	3	a	0.03781	0.04746
		b	0.03589	0.04509
		c	0.03589	0.04509
2	4	b	0.01073	0.01479
		c	0.03631	0.04561
4	5	b	0.03631	0.04561
		c	0.03631	0.04561
2	6	a	0.04449	0.05547

Ramas		Fases	Caso 4	Caso 5
			THDi (%)	THDi (%)
		b	0.03911	0.04904
		c	0.03906	0.04897
6	7	a	0.05276	0.06548
		b	0.02741	0.03456
		c	0.03458	0.04346
6	8	a	0.03835	0.04813
		c	0.04534	0.05655
8	9	c	0.04534	0.05655
6	10	a	0	0
		b	0	0
		c	0	0
8	11	c	0.03835	0.04813

Para este caso no se evidencian porcentajes elevados de distorsión en las ramas del sistema.

Cuadro 33. Resultados THDi individual en los nodos del SDEE de 11 barras a partir de los casos de estudio

Nodos	fases	Distorsión armónica individual por nodo									
		THDi3 (%)		THDi5 (%)		THDi7 (%)		THDi9 (%)		THDi11 (%)	
		Caso 4	Caso 5	Caso 4	Caso 5	Caso 4	Caso 5	Caso 4	Caso 5	Caso 4	Caso 5
2	a	1.192	3.21	8.346	15.335	5.067	2.496	0.894	2.496	0.298	2.496
	b	3.056	3.535	10.086	10.959	3.056	3.182	1.528	1.768	1.834	1.768
	c	2.134	0.723	7.318	16.275	4.574	2.893	1.525	1.808	1.525	1.808
3	a	0.003	0.008	0.029	0.045	0.023	0.009	0.005	0.01	0.002	0.01
	b	0.003	0.008	0.028	0.043	0.022	0.008	0.005	0.009	0.002	0.009
	c	0.003	0.008	0.028	0.043	0.022	0.008	0.005	0.009	0.002	0.009
4	b	0.003	0.008	0.028	0.043	0.022	0.009	0.005	0.009	0.002	0.009
	c	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	b	0.003	0.008	0.028	0.043	0.022	0.009	0.005	0.009	0.002	0.009
	c	0.003	0.008	0.028	0.043	0.022	0.009	0.005	0.009	0.002	0.009
6	a	0.003	0.009	0.032	0.049	0.025	0.01	0.006	0.011	0.002	0.011
	b	0.003	0.009	0.033	0.05	0.026	0.01	0.006	0.011	0.002	0.011

Nodos	fases	Distorsión armónica individual por nodo									
		THDi3 (%)		THDi5 (%)		THDi7 (%)		THDi9 (%)		THDi11 (%)	
		Caso 4	Caso 5	Caso 4	Caso 5	Caso 4	Caso 5	Caso 4	Caso 5	Caso 4	Caso 5
7	c	0.003	0.008	0.031	0.048	0.025	0.01	0.005	0.01	0.002	0.01
	a	0.004	0.01	0.041	0.062	0.033	0.013	0.007	0.014	0.003	0.014
	b	0.002	0.006	0.021	0.033	0.016	0.006	0.004	0.007	0.002	0.007
8	c	0.003	0.007	0.027	0.041	0.021	0.008	0.005	0.009	0.002	0.009
	a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	c	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	a	0.003	0.009	0.035	0.053	0.028	0.011	0.006	0.012	0.003	0.012
10	a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	b	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	c	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	c	0.003	0.008	0.03	0.045	0.023	0.009	0.005	0.01	0.002	0.01

El quinto armónico presenta las distorsiones más elevadas en el nodo 2 el cuál atiende la estación VE.

Cuadro 34. Resultados THDi individual por ramas en el SDEE de 11 barras a partir de los casos de estudio

Ramas	fases	Distorsión armónica individual por rama										
		THDi3 (%)		THDi5 (%)		THDi7 (%)		THDi9 (%)		THDi11 (%)		
		Caso 4	Caso 5	Caso 4	Caso 5	Caso 4	Caso 5	Caso 4	Caso 5	Caso 4	Caso 5	
1	2	a	0.0322	0.0828	0.2042	0.3592	0.1266	0.0475	0.0224	0.0194	0.0107	0.0576
	b	0.0921	0.0958	0.2871	0.2504	0.0806	0.0738	0.042	0.0191	0.0539	0.0534	
	c	0.0442	0.018	0.1692	0.3087	0.0862	0.0398	0.0292	0.0201	0.0278	0.0217	
2	3	a	0.0031	0.0081	0.0295	0.0448	0.0229	0.0089	0.005	0.0032	0.0021	0.0097
	b	0.003	0.0077	0.028	0.0425	0.0217	0.0084	0.0048	0.003	0.002	0.0092	
	c	0.003	0.0077	0.028	0.0425	0.0217	0.0084	0.0048	0.003	0.002	0.0092	
2	4	b	0.0015	0.004	0.0092	0.014	0.0052	0.002	0.0009	0.0006	0.0003	0.0014
	c	0.003	0.0078	0.0283	0.043	0.0219	0.0085	0.0048	0.003	0.002	0.0093	
4	5	b	0.003	0.0078	0.0283	0.043	0.0219	0.0085	0.0048	0.003	0.002	0.0093
	c	0.003	0.0078	0.0283	0.043	0.0219	0.0085	0.0048	0.003	0.002	0.0093	
2	6	a	0.0035	0.009	0.0344	0.0522	0.0272	0.0106	0.0061	0.0038	0.0026	0.0118

Ramas	fases	Distorsión armónica individual por rama										
		THDi3 (%)		THDi5 (%)		THDi7 (%)		THDi9 (%)		THDi11 (%)		
		Caso 4	Caso 5	Caso 4	Caso 5	Caso 4	Caso 5	Caso 4	Caso 5	Caso 4	Caso 5	
	b	0.0032	0.0083	0.0304	0.0463	0.0237	0.0092	0.0052	0.0033	0.0022	0.0101	
	c	0.0032	0.0082	0.0304	0.0462	0.0237	0.0092	0.0052	0.0033	0.0022	0.0101	
6	7	a	0.0039	0.0102	0.0406	0.0617	0.0325	0.0127	0.0073	0.0046	0.0031	0.0142
		b	0.0023	0.0061	0.0215	0.0326	0.0165	0.0064	0.0036	0.0023	0.0015	0.0069
		c	0.0029	0.0075	0.027	0.041	0.0209	0.0081	0.0046	0.0029	0.0019	0.0089
6	8	a	0.0031	0.0082	0.0299	0.0454	0.0232	0.009	0.0051	0.0032	0.0022	0.0099
		c	0.0035	0.0091	0.0351	0.0533	0.0277	0.0108	0.0061	0.0039	0.0026	0.0119
8	9	c	0.0035	0.0091	0.0351	0.0533	0.0277	0.0108	0.0061	0.0039	0.0026	0.0119
6	10	a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		b	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		c	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	11	c	0.0031	0.0082	0.0299	0.0454	0.0232	0.009	0.0051	0.0032	0.0022	0.0099

Al igual que en la tabla anterior, el quinto armónico es el que presenta distorsiones más elevadas.

c. Comparativa de valores de THD con respecto al Estándar 519 IEEE.

Se presentan los porcentajes de distorsión en tensión y corriente armónica permitidos en una red con tensiones entre 1 kV y 69 kV.

Cuadro 35. Valores máximos de distorsión armónica de tensión individual por nodo

THDv individual 33 barras							THDv individual permitido (%)
Caso 2	Caso 3	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 2	Caso 3	
THDv5 (%)	THDv5 (%)	THDv 7(%)	THDv 7(%)	THDv 7(%)	THDv 9(%)	THDv 9(%)	
0.122	0.1229	0.1103	0.1864	0.1841	0.1044	0.1115	3

Según los valores máximos obtenidos en la

Cuadro 29 y la Cuadro 30 se puede decir que cumple los estipulado con el estándar IEEE 519.

Cuadro 36. Valores máximos de distorsión armónica total de tensión

THDv total 33 barras			THDv total permitido (%)
Caso 1	Caso 2	Caso 3	
THDv (%)	THDv (%)	THDv (%)	
0.14116	0.24828	0.25105	5

Los máximos valores de las distorsiones armónicas totales para los diferentes casos en el sistema de 33 barras de estudio cumplen al tener un valor porcentual menor al 5%.

Cuadro 37. Valores máximos de distorsión armónica individual por rama

THDi individual 33 barras						THDi individual permitido (%)
Caso 3	Caso 2	Caso 3	Caso 2	Caso 3	Caso 2	
THDi3 (%)	THDi5 (%)	THDi5 (%)	THDi 7(%)	THDi 7(%)	THDi 9(%)	
1.0699	3.2243	5.112	3.6481	1.8992	1.2899	4

En el caso de estudio 3 no se cumple con el estándar debido a que la distorsión armónica individual con respecto al quinto armónico sobrepasa el 4%.

Cuadro 38. Valores máximos de distorsión armónica individual por rama 11 barras

THDi individual 11 barras		THDi individual permitida (%)
THDi5 (%)		
Caso 4	Caso 5	
0.2042	0.3592	4
0.2871	0.2504	4
0.1692	0.3087	4

En el modelo de once barras se cumple con el estándar debido a que los máximos valores de distorsión armónica individual no supera al 4%.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo de grado estuvo centrado en el cálculo de la distorsión armónica de una red de distribución que tiene incorporadas estaciones de recarga rápida de vehículos eléctricos.

El estudio parte de la identificación y modelado tanto de la red eléctrica como de las estaciones de recarga y previamente de deben tener definidas las ubicaciones de las estaciones de recarga. En el caso de la estación, si esta no posee un filtro de armónicos calculado correctamente o el convertidor DC/DC trabaja sin un control adecuado, los armónicos inyectados a la red serán elevados. En el caso de los sistemas de distribución es importante considerar las condiciones y los elementos conectados en la red previo a la incorporación de una estación ya que estos pueden presentar alteraciones en frecuencias diferentes a la fundamental.

El diseño de los casos de estudio con diferentes niveles de penetración es necesario para visualizar comportamientos entre las señales de tensión y corriente de los sistemas, debido a que como se expuso en este documento el número de estaciones y los cambios en los estados de carga producen alteraciones que se ven reflejadas en la red.

Los resultados de este trabajo de grado proporcionan claridad en el comportamiento de los armónicos en las redes de distribución, mostrando principalmente que varias estaciones conectadas y cambios en los procesos de carga generan impactos en los armónicos que se presentan en la red. Teniendo en cuenta que estas distorsiones pueden causar calentamiento en los conductores, generar fallas, interrumpir comunicaciones etc., es necesario realizar estudios previos a la

instalación de estas cargas no lineales, buscando seguir normativas propuestas por entidades competentes.

En el caso de la estación de carga fue necesario realizar una simulación discretizada, debido a que requería menores recursos computacionales, a causa de esto y al tratamiento que se realizó en las señales discretizadas, es posible que los datos de corriente obtenidos de la simulación de la estación no tengan los datos más precisos, se considera que con mejores herramientas de cómputo se pueda desarrollar un estudio más preciso.

La distorsión armónica total THD vista en la barra del transformador no presenta incumplimientos con la normativa de referencia, debido a que la distorsión vista desde el alimentador considera la corriente total en el SDEE, sin embargo, al realizar la toma de medidas en segmentos del sistema cercanos a la estación se puede apreciar la inyección armónica de la misma a esta rama de la red.

Ante la instalación de un transformador con conexión Δ/Y para conectar la estación se evidenció que los valores de la componente de corriente del tercer armónico son notablemente menores con respecto al quinto y séptimo, corroborando así que la parte Δ del transformador realiza un filtrado del armónico 3.

Se esperaban mejores resultados en el armónico 9, al ser este múltiplo de 3 gran parte de su distorsión debería quedarse en el delta del transformador según lo comentado en la literatura, es posible que se deba a la imprecisión de los datos recopilados.

Se considera necesario seguir el procedimiento para evaluar cuantas estaciones puede recibir una red sin disminuir la calidad de la energía que es proporcionada a los usuarios conectados.

5. ESTUDIOS FUTUROS

Es importante destacar que la estación de carga expuesta en este documento no es el único modelo encontrado comercialmente, por lo tanto, se considera necesario realizar el estudio de armónicos a cada modelo, suponiendo comportamientos diferentes en los armónicos inyectados y por lo tanto un impacto diferente al funcionar en conjunto con la red.

El estudio presentado en este documento inicialmente pretendía realizar una simulación en un rango de tiempo continuo, sin embargo, el software y el hardware disponibles no tenían la capacidad necesaria para cumplir esta labor, por lo tanto, se considera que un estudio más detallado y preciso se podría realizar con mejores herramientas, simulando una carga continua conectada a una estación durante un tiempo determinado.

Se considera que las estaciones de carga no solo deben depender de la energía que proporciona la red, es necesario emplear otras fuentes de energía para alimentar la estación, como solar, eólica o bancos de baterías que disminuyan los esfuerzos a los que se somete el sistema con estas cargas no lineales, entrando en funcionamiento cuando la demanda sea más elevada según los estudios que brindan los operadores de red.

BIBLIOGRAFÍA

ALCALDIA DE BUCARAMANGA, Decreto No. 0138 del 2018, por el cual clasifica al municipio de Bucaramanga como categoría espacial, para la vigencia 2019, Bucaramanga, 2018.

ANIL Lalitha, TRUPATHI Abha, NAGESH Suresh, NIKITHA L Effect od Electrical Vehicle Chargin on Power Quality,» de International Conference on circuits Power and Computing Technologies [ICCPCT], 2017

ARANCIBIA, Arnaldo; STRUNZ, Kai. Modeling of an Electric Vehicle Charging Station for Fast DC Charging,» IEEE, 2018.

ARCHUNDIA-ARANDA, I; MOTA-PALOMINO, R.O Harmonic Load Flow Method for Radial Distribution Networks, IEEE, 2010.

ARDILA PRADA, Brayan; OCHOA VILLABONA, Yeison Ubicación óptima de una estación de recarga pública para vehículos eléctricos en una red de distribución de energía eléctrica., Bucaramanga, 2018

COLOMBIA CONGRESO DE LA REPUBLICA, Ley No. 1964 del 11 de julio 2019, por medio de la cual se promueve el uso de vehículos eléctricos en Colombia, 2019.

COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL, IEC 61000-3-2. Compatibilidad electromagnética. Parte 3-2. Límites para las emisiones de corriente armónica., AENOR, 2019

COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL, IEC 618151-1.Sistema conductivo de carga para vehículos eléctricos. Parte 1. Requisitos Generales, AENOR, 2020

COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL, IEC 618151-22.Sistema conductivo de carga para vehículos eléctricos. Parte 22: Estaciones de carga en c.a para vehículos eléctricos, AENOR, 2002.

EPM, Norma Técnica: Instalación de Estaciones de Carga para Vehículos Eléctricos, 2019

FASUGBA, MCDAVIS A.; KREIN, Philip T.Gaining vehicle-to-grid benefits with unidirectional electric and plug-in hybrid vehicle chargers,» IEEE, 2011

HART D. W., «El convertidor reductor,» de Electrónica de potencia , 2001

ICONTEC, Código Eléctrico Colombiano NTC 2050, 1998

IDEAM, «Inventario Nacional y Departamental de Gases de Efecto Invernadero-Colombia,» 2014.

IEEE POWER & ENERGY SOCIETY, IEEE Standard 1459. Definitions for the Measurement of Electric Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions, IEEE, 2010.

IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, IEEE Standard. 519. Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, Nueva York, 2014.

JUÁREZ CERVANTES, José Dolores Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica, Universidad Autónoma Metropolitana, 1995.

KERSTING, William H. Distribution System Modeling and Analysis, Tercera ed., New Mexico: CRC Press., 2012.

KERSTING, William H. Radial distribution test feeders,» de IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings, 2001.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas. RETIE, 2013

MURTADHA OTHMAN, Muhammad; MOHD SHOKRI, Siti Mariam; ABDUL RAZAK, Muhd Azri; ZILAILA, Zakaria A Direct Approach Used for Solving the Distribution System and Harmonic Load Flow Solutions,» de IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference, 2013.

PADARBINDA, Samal; SANJIB, Ganguly A Modified Forward Backward Sweep Load, IEEE, 2015

PETIT, Johann Farith Control de Filtros Activos de Potencia para la Mitigación de Armónicos y Mejora del Factor de Potencia en Sistemas Desequilibrados, Madrid, 2007.

RAHIMI-EICHI, Habiballah; CHOW, Mo-Yuen Radial distribution test feeders,» de IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings, 2001

ROY SUIJIT, Kumar KARMALER Ashish, AHMED Raju. Analysis of the Impact of Electric Vehicle Charging Station on Power Quality Issues,» de International

Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE), 2019.

TASK FORCE ON HARMONIC MODELING AND SIMULATION, IEEE Power Eng. Soc. T&D Committee*, «Impact of Aggregate Linear Load Modeling on,» IEEE Transactions on power delivery, vol. XVII, n° 2, 2003.

TREMBLAY, Olivier; DESSAINT, Louis-A Gaining vehicle-to-grid benefits with unidirectional electric and plug-in hybrid vehicle chargers,» IEEE, 2011.

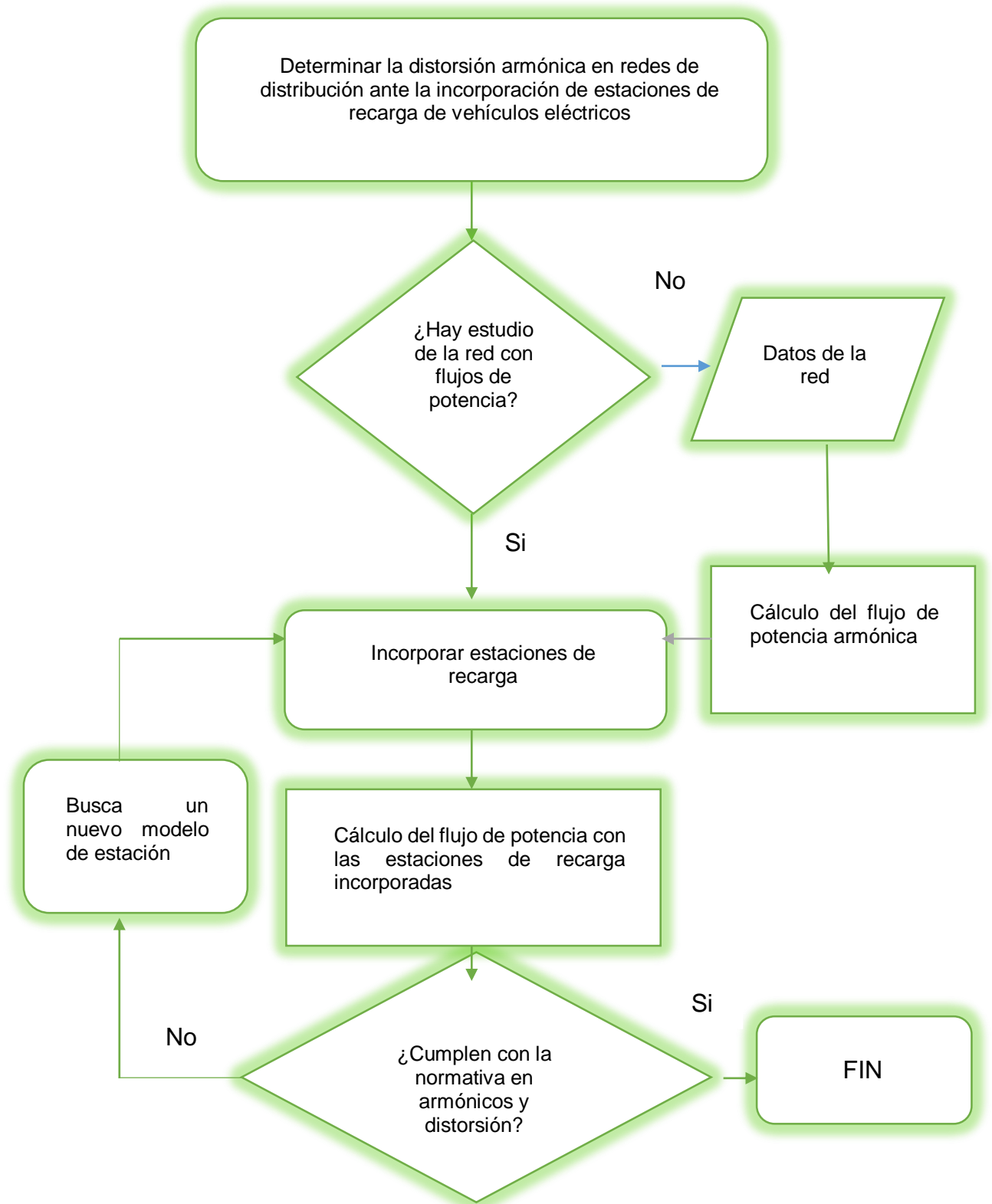
YILMAZ, Murat; KREIN, Philip T. Review of Battery Charger Topologies, Charging,» IEEE, 2013.

YING YONG, Jia; MAHDI FAZELI, Seyed; RAMACHANDARAMURTHY, Vigna K.; MIAO TAN, Kang, «Design and development of a three-phase off-board electric vehicle charger prototype for power grid voltage regulation,» ScienceDirect , 2017

YING YONG, Jia; RAMACHANDARAMURTHY, Vigna K.; MIAO TAN, Kang; MITHULANANTHAN, NBi-directional electric vehicle fast charging station with novel reactive power compensation for voltage regulation,» ScienceDirect, 2015.

ANEXOS

Anexo A. Algoritmo para el desarrollo del estudio



Anexo B. Parámetros del sistema de 33 barras

Tabla A. 1. Valores de la impedancia de línea en el sistema 33 barras

Línea		Resistencia and Reactancia (Ω)		Resistencia and Reactancia (p.u)	
Desde	Hasta	R (Ω)	X (Ω)	R (p.u)	X (p.u)
1	2	0.0922	0.0470	0.0053	0.0027
2	3	0.4930	0.2511	0.0283	0.0144
3	4	0.3660	0.1864	0.0210	0.0107
4	5	0.3811	0.1941	0.0219	0.0111
5	6	0.8190	0.7070	0.0470	0.0406
6	7	0.1872	0.6188	0.0107	0.0355
7	8	0.7114	0.2351	0.0408	0.0135
8	9	1.0300	0.7400	0.0591	0.0425
9	10	1.0440	0.7400	0.0599	0.0425
10	11	0.1966	0.0650	0.0113	0.0037
11	12	0.3744	0.1298	0.0215	0.0074
12	13	1.4680	1.1550	0.0843	0.0663
13	14	0.5416	0.7129	0.0311	0.0409
14	15	0.5910	0.5260	0.0339	0.0302
15	16	0.7463	0.5450	0.0428	0.0313
16	17	1.2890	1.7210	0.0740	0.0988
17	18	0.7320	0.5740	0.0420	0.0329
2	19	0.1640	0.1565	0.0094	0.0090
19	20	1.5042	1.3554	0.0863	0.0778
20	21	0.4095	0.4784	0.0235	0.0275
21	22	0.7089	0.9373	0.0407	0.0538
3	23	0.4512	0.3083	0.0259	0.0177
23	24	0.8980	0.7091	0.0515	0.0407
24	25	0.8960	0.7011	0.0514	0.0402
6	26	0.2030	0.1034	0.0117	0.0059
26	27	0.2842	0.1447	0.0163	0.0083
27	28	1.0590	0.9337	0.0608	0.0536
28	29	0.8042	0.7006	0.0462	0.0402

Línea		Resistencia and Reactancia (Ω)		Resistencia and Reactancia (p.u)	
Desde	Hasta	R (Ω)	X (Ω)	R (p.u)	X (p.u)
29	30	0.5075	0.2585	0.0291	0.0148
30	31	0.9744	0.9630	0.0559	0.0553
31	32	0.3105	0.3619	0.0178	0.0208
32	33	0.3410	0.5302	0.0196	0.0304

Tabla A. 2. Valores de las cargas conectadas en el sistema de 33 barras

Número de Barra	Carga Nominal		Carga	
	P (kW)	Q(kVAr)	P (p.u)	Q (p.u)
1	0	0	0	0
2	100	60	0.01	0.006
3	90	40	0.009	0.004
4	120	80	0.012	0.008
5	60	30	0.006	0.003
6	60	20	0.006	0.002
7	200	100	0.02	0.01
8	200	100	0.02	0.01
9	60	20	0.006	0.002
10	60	20	0.006	0.002
11	45	30	0.0045	0.003
12	60	35	0.006	0.0035
13	60	35	0.006	0.0035
14	120	80	0.012	0.008
15	60	10	0.006	0.001
16	60	20	0.006	0.002
17	60	20	0.006	0.002
18	90	40	0.009	0.004
19	90	40	0.009	0.004
20	90	40	0.009	0.004
21	90	40	0.009	0.004
22	90	40	0.009	0.004
23	90	50	0.009	0.005
24	420	200	0.042	0.02
25	420	200	0.042	0.02

Número de Barra	Carga Nominal		Carga	
	P (kW)	Q(kVAr)	P (p.u)	Q (p.u)
26	60	25	0.006	0.0025
27	60	25	0.006	0.0025
28	60	20	0.006	0.002
29	120	70	0.012	0.007
30	200	600	0.02	0.06
31	150	70	0.015	0.007
32	210	100	0.021	0.01
33	60	40	0.006	0.004

Anexo C. Parámetros del sistema de 11 barras.

Tabla A. 3. Distancias y configuraciones en sistema de 11 barras

Rama	Nodo A	Nodo B	Distancia (milla)	Distancia (pies)	Configuración.
1	1	2	0.3788	2000	601
2	2	3	0.0947	500	602
3	2	4	0.0947	500	603
4	4	5	0.0568	300	603
5	2	6	0.3788	2000	601
6	6	7	0.0947	500	606
7	6	8	0.0568	300	604
8	8	9	0.0568	300	605
9	6	10	0.1894	1000	601
10	8	11	0.1515	800	607

Tabla A. 4. Potencia y tipo de conexión en las cargas conectadas al sistema de 11 barras

Nodo	Fase-A		Fase-B		Fase-B		Tipo carga			Conexión	
	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr	PQ	I	Z	Estrella	Delta
2	17	10	66	38	117	68	1	0	0	1	0
3	160	110	120	90	120	90	1	0	0	1	0
4	0	0	170	125	0	0	1	0	0	1	0
5	0	0	230	132	0	0	0	0	1	0	1
6	385	220	385	220	385	220	1	0	0	0	1
6	0	0	0	0	170	151	0	1	0	0	1
6	17	10	66	38	117	68	1	0	0	1	0
7	485	190	68	60	290	212	1	0	0	1	0
9	0	0	0	0	170	80	0	1	0	1	0
11	128	86	0	0	0	0	0	0	1	1	0

Tabla A. 5. Cargas conectadas al sistema de 11 barras en por unidad

Nodo	Fase-A/ línea ab		Fase-B/ línea bc		Fase-B/ línea ca	
	P	Q	P	Q	P	Q
2	0.0017	0.001	0.0066	0.0038	0.0117	0.0068
3	0.016	0.011	0.012	0.009	0.012	0.009
4	0	0	0.017	0.0125	0	0
5	0	0	0.023	0.0132	0	0
6	0.0385	0.022	0.0385	0.022	0.0385	0.022
6	0	0	0	0	0.017	0.0151
6	0.0017	0.001	0.0066	0.0038	0.0117	0.0068
7	0.0485	0.019	0.0068	0.006	0.029	0.0212
9	0	0	0	0	0.017	0.008
11	0.0128	0.0086	0	0	0	0

Tabla A. 6. Compensación reactiva conectada al sistema de 11 barras

Nodo	Fase-A	Fase-B	Fase-C
	kVAr	kVAr	kVAr
7	200	200	200
9	0	0	100

Tabla A. 7. Compensación reactiva en p.u

Nodo	Fase-A	Fase-B	Fase-C
	Q	Q	Q
7	0.02	0.02	0.02
9	0	0	0.01

Anexo D. Resultados de la simulación de la estación

Simulación 1: SOC inicial 70% con 30 minutos de carga.

Tabla A. 8. Resultados al inicio de la simulación 1

	ia		ib		ic		Va		Vb		Vc	
THD	72.49%		72.85%		73.28%		1.65%		1.58%		1.64%	
	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase
Fund	3.98	4.8	3.9	24.6	4.05	126.6	10775.9	-0.1	10776.89	239.9	10776.76	119.9
h3	0.02	-19.2	0.02	206.2	0.02	107.7	0.52	236.2	0.29	107.6	0.41	22
h5	0.15	98.9	0.277	223.1	0.22	8.3	6.26	0.4	11.15	124.5	9.24	-89.7
h7	0.17	151.9	0.09	27.9	0.14	-62.4	11.44	40.2	6.19	-84.5	9.41	187.4
h9	0.06	92.3	0.06	-70.5	0.02	199.3	6.57	-42.5	6.62	155.7	2.09	55
h11	0.02	67.5	0.03	28.2	0.04	222.3	2.33	262.1	2.91	226.5	4.99	62.3

Tabla A. 9. Resultados al final de la simulación 1

	ia		ib		ic		Va		Vb		Vc	
THD	80.86%		78.76%		81.74%		1.62%		1.61%		1.57%	
	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase
Fund	3.47	9.6	3.51	247.8	3.39	128.2	10778.1	-0.1	10777.48	239.9	10777.51	119.9
h3	0.16	-7.4	0.17	186.8	0.04	65.3	3.17	258.3	3.66	92.8	0.99	-33.8
h5	0.37	180.6	0.17	261	0.43	24	15.08	82.4	7.04	164.3	17.51	-74.2

	ia		ib		ic		Va		Vb		Vc	
THD	80.86%		78.76%		81.74%		1.62%		1.61%		1.57%	
	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase
h7	0.1	181	0.17	7.2	0.07	196.4	6.76	74.5	12.3	256.3	5.55	78.6
h9	0.07	-11.2	0.1	212.2	0.07	7.5	7.8	212.9	11.56	76.5	7.99	-61.2
h11	0.03	6.1	0.01	29.9	0.04	191.7	3.86	197.4	1.68	249.6	5.06	32.6

Simulación 2: SOC inicial 50% con 30 minutos de carga.

Tabla A. 10. Resultados al inicio de la simulación 2.

THD	72.14%		72.59%		71.72%		2.11%		2.04%		2.06%	
	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase
Fund	4.03	2.4	3.94	244.3	4.11	124.77	10773.88	-1.9	10774.92	2388.1	10774.91	118.1
h3	0.03	-71.9	0.05	210.3	0.07	57.8	0.67	184.3	4.75	144	2.61	122.2
h5	0.18	80.7	0.24	195.5	0.23	-32.6	7.39	-17.5	18.37	141.8	15.7	258.6
h7	0.19	147.2	0.01	18.5	0.15	-63.2	12.89	35.9	25.68	-35	32.57	168.7
h9	0.08	88.6	0.09	-77.4	0.02	158.8	8.17	-45.3	18.52	97.7	20.28	268.5
h11	0.03	64	0.02	-25.9	0.04	212.3	4.27	258	8.79	-69.1	14.01	196.4

Tabla A. 11. Resultados finalizando la simulación 2.

	ia		ib		ic		Va		Vb		Vc	
THD	89.35%		90.95%		89.12%		2.07%		2.07%		2.02%	
	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase
Fund	3.22	8	3.16	247.2	3.15	128.4	10776.34	-1.9	10776.1	238.1	10776.47	118.1
h3	0.1	171.4	0.05	15.7	0.06	-27.6	2.1	75.1	0.86	-76.9	1.4	238.5
h5	0.26	147.2	0.14	262.7	0.23	0.6	10.6	48.8	5.83	166.77	9.41	262.1

	ia		ib		ic		Va		Vb		Vc	
THD	89.35%		90.95%		89.12%		2.07%		2.07%		2.02%	
	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase
h7	0.08	177.8	0.19	46.3	0.15	250.9	5.25	67.8	13.03	-62.9	10.4	139.6
h9	0.04	159.2	0.03	26.1	0.03	-76.8	4.45	22.9	3.66	249.1	3.26	148.9
h11	0.03	14.4	0.04	183.1	0.01	-32.2	3.68	2066.4	4.39	14.88	1.08	151.3

Simulación 3: SOC inicial del 30% con 50 minutos de carga.

Tabla A. 12. Resultados al inicio de la simulación 3

	ia		ib		ic		Va		Vb		Vc	
THD	68.59%		71.05%		71.71%		2.05%		2.07%		2.07%	
	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase
Fund	4.07	7.6	4.03	247.5	4.05	128.1	10774.6	1.7	10774.75	241.7	10774.89	121.7
h3	0.04	29.5	0.1	204.2	0.07	21.1	0.77	-77.9	2.14	106.6	1.37	-70.9
h5	0.28	131.6	0.33	266.4	0.24	30.2	11.47	33.5	13.7	168	9.95	-76.4
h7	0.17	144.4	0.1	21.2	0.15	-69.6	12.22	31	66.44	268	10.26	179.2
h9	0.03	23.5	0.05	-81.3	0.05	132.9	3.43	246.3	4.79	142.4	5.17	2.4
h11	0.01	269.7	0.06	44.9	0.05	214.3	1.76	130.4	7.03	242.5	6.57	48.1

Tabla A. 13. Resultados finalizando la simulación 3

	ia		ib		ic		Va		Vb		Vc	
THD	81.72%		80.79%		81.60%		2.08%		2.05%		2.03%	
	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase
Fund	3.48	11	3.45	250.1	3.42	130.9	10776.1	1.7	10775.86	241.7	10776.12	121.7
h3	0.09	-70	0.1	122.4	0.02	3	2.01	194.5	2.19	28.3	0.54	-88.9
h5	0.43	187	0.31	-66.3	0.45	48.1	17.43	89.2	12.54	196	18.3	-49.8
h7	0.07	102	0.09	-22.1	0.08	203.6	4.75	-14.6	6.62	223	5.72	87.5
h9	0.02	-53.8	0.02	212.3	0.03	74.5	2.15	170.2	2.7	79.2	3.42	-61.9
h11	0.07	-2	0.05	130.9	0.05	229.5	8.07	193.4	6.65	-37.4	6.45	66.6