



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE GUAYAQUIL**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**DETERMINACION DEL IMPACTO DE LA CARGA DE VEHICULOS ELECTRICOS EN  
UNA RED DE DISTRIBUCION PARA EL SECTOR RESIDENCIAL**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero Eléctrico

**AUTORES:** Jorge Andrés Guanoluisa Valencia  
Willy Andrés Guerrero Chica

**TUTOR:** Ing. Carlos Fernando Chávez Córdova, MSc.

**Guayaquil – Ecuador**

**2026**

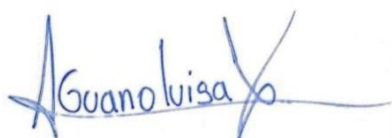
## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Jorge Andres Guanoluisa Valencia con documento de identificación N° 0955848544 y Willy Andres Guerrero Chica con documento de identificación N° 0950967547; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 23 de enero del año 2026

Atentamente,



---

Jorge Andres Guanoluisa Valencia

0955848544



---

Willy Andres Guerrero Chica

0950967547

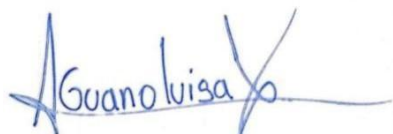
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Jorge Andrés Guanoluisa Valencia con documento de identificación N° 0955848544 y Willy Andrés Guerrero Chica con documento de identificación N° 0950967547, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de lo que somos autores del Proyecto Técnico: DETERMINACION DEL IMPACTO DE LA CARGA DE VEHICULOS ELECTRICOS EN UNA RED DE DISTRIBUCION PARA EL SECTOR RESIDENCIAL el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 23 de enero del año 2026.

Atentamente,



---

Jorge Andrés Guanoluisa Valencia

0955848544



---

Willy Andrés Guerrero Chica

0950967547

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Carlos Fernando Chávez Córdova con documento de identificación N° 0919553438, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DETERMINACION DEL IMPACTO DE LA CARGA DE VEHICULOS ELECTRICOS EN UNA RED DE DISTRIBUCION PARA EL SECTOR RESIDENCIAL, realizado por Jorge Andrés Guanoluisa Valencia con documento de identificación N° 0955848544 y Willy Andrés Guerrero Chica con documento de identificación N° 0950967547, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 23 de enero del año 2025.

Atentamente,



---

Carlos Fernando Chávez Córdova

0919553438

## DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios, mi familia, mis amigos, mis jefes y a todas aquellas personas que confiaron en mí a lo largo de este camino; sin ellos, hoy no podría estar escribiendo esto.

A Dios, por ayudarme a seguir a pesar del agotamiento y de la falta de motivación para seguir adelante. A mi familia, que ha cuidado de mí desde siempre y hoy logran ver en lo que me he convertido gracias a su crianza y amor incondicional. A mis amigos, por acompañarme en este camino llamado vida, por tenerme tanto cariño y alegrarme los días de mayor estrés. A mis maestros y jefes, que no solo fueron una guía en estos cuatro años de aprendizaje, sino que también fueron mi ejemplo a seguir tanto en mi forma de ser como en mi forma de trabajar. A las personas que ya no están, porque su breve paso por mi vida fue suficiente para convertirme en la persona que soy hoy.

Por último, a la gente que me ama a pesar de mis errores y aciertos, y que me sigue apoyando y queriendo. Sé que a ellos más que nadie, incluyéndome, les traerá felicidad este nuevo logro en mi vida.

Jorge Andrés Guanoluisa Valencia

Este proyecto le dedico a Dios quien fue mi fortaleza todo este tiempo para no decaer y seguir dando lo mejor de mí en este proyecto, dándome la sabiduría para poder afrontar todas las etapas difíciles en mi vida que no creía lograrlas, por siempre estar dándome valor para lograr todas aquellas pruebas con tu amor y misericordia.

A mi familia mi mayor fortaleza y mi razón de ser. Por su gran amor, paciencia y su apoyo constante han sido mi estabilidad para seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles de este camino. Gracias por la enseñanza del verdadero esfuerzo, responsabilidad y perseverancia. Cada paso que di y cada meta que alcancé ustedes fueron mi pilar fundamental. Todo lo que soy y todo lo que he logrado es reflejo de su sacrificio silencioso, de su confianza permanente y de su fe en mí, aun en aquellos instantes en los que yo mismo dudé. Esta tesis no representa únicamente un logro académico personal, sino que es también un homenaje a su entrega, a su apoyo incondicional y al amor que siempre me ha acompañado.

A mis amigos, que fueron un apoyo emocional, por sus palabras de ánimo y las risas que contagiaban a todo el grupo nos hacía quitar esa presión y estrés la cual me mantenía tranquilo. El “Team irrompible” que fue un grupo de amigos que se sintió como una familia y siempre seré feliz de pertenecer a ese grupo.

Willy Andrés Guerrero Chica

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por darme vida, salud y fortaleza para seguir adelante a pesar de los días malos.

A mis padres, por amarme incondicionalmente, cuidarme y apoyarme en este camino, donde fueron mi guía para convertirme no solo en un buen hijo, sino también en una buena persona.

A mis jefes, en especial al Ing. Fernando Saverio por su paciencia y sus enseñanzas a lo largo de estos años. Más que un jefe o un maestro, es para mí un ejemplo de lo que es ser un ingeniero eléctrico.

A mis amigos, los que están y los que no. Gracias por brindarme de su tiempo, cariño y alegría, es debido a su amor y afecto que puedo sonreír cada día más.

A mis maestros, que gracias a sus clases podré ejercer mi carrera y aportar en lo que es la ingeniería eléctrica con pasión, amor y responsabilidad.

A mi pareja, por estar conmigo, darme amor y paz, y, sobre todo, hacerme seguir luchando por un futuro brillante para mí.

Jorge Andrés Guanoluisa Valencia

A Dios, por ser la luz y fortaleza de mi camino. Por siempre darme calma, la fe y la fuerza necesaria para no rendirme ante mis dificultades, sin su guía, ni amor este logro no se hubiera posible.

A mi mamá Violeta Chica, que es un pilar en mi vida, gracias por tu apoyo día a día haciendo sentir que puedo lograr cada cosa con esfuerzo y dedicación, este trabajo es también reflejo de su entrega y confianza, cuando intente rendirme fuiste tú la que creyó en mí.

A mis amigos, por su compañía sincera, por las risas que aliviaron el cansancio y por las palabras de ánimo cuando más las necesitaba. Su presencia fue un impulso invaluable a lo largo de este proceso.

Y finalmente, a Ariana mi compañera de vida que durante estos cuatro años estuvo siempre presente, haciéndome sentir orgulloso de cada avance y acompañándome con su apoyo incondicional por no hacerme dudar de mis capacidades. A todos quienes, de una u otra forma, fueron parte de este camino, mi más sincero agradecimiento.

Willy Andres Guerrero Chica

## INDICE DE CONTENIDO

PORTADA.....	i
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.....	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT .....	xiii
ACRÓNIMOS.....	xiv
1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Título .....	1
1.2. Introducción .....	1
1.3. Planteamiento del problema .....	1
1.4. Justificación.....	2
1.4.1. Justificación del problema:.....	2
1.4.2. Justificación académica.....	2
1.4.3. Justificación económica .....	2
1.4.4. Justificación social .....	2
1.5. Delimitación del problema .....	3
1.6. Beneficiarios del análisis de estudio .....	3
1.6.1. Comunidad: .....	3
1.6.2. Universidad Politécnica Salesiana (UPS): .....	3
1.7. Objetivos .....	3
1.7.1. Objetivo general .....	3
1.7.2. Objetivos específicos.....	3
1.8. Metodología y equipos .....	4
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	5

2.1.	Introducción general y justificación académica .....	5
2.2.	Transición energética, sostenibilidad y sistemas eléctricos de potencia .....	6
2.2.1.	Transición energética y descarbonización.....	6
2.2.2.	Sistemas eléctricos de potencia y su estructura.....	6
2.3.	Vehículos eléctricos: fundamentos técnicos .....	6
2.3.1.	Definición y características generales .....	6
2.4.	Clasificación de los vehículos eléctricos.....	8
2.4.1.	Vehículos Eléctricos de Batería (BEV) .....	8
	Vehículos Híbridos Enchufables (PHEV) .....	8
2.4.2.	Vehículos Híbridos Convencionales (HEV).....	8
2.5.	Infraestructura de carga de vehículos eléctricos.....	8
2.5.1.	Tipología de sistemas de carga.....	8
2.6.	Electrónica de potencia asociada a los cargadores .....	8
2.7.	Redes de distribución de energía eléctrica .....	9
2.7.1.	Concepto y función .....	9
2.7.2.	Planeación y criterios de diseño .....	9
2.7.3.	Potencia eléctrica en sistemas de distribución .....	9
2.8.	Impacto de los vehículos eléctricos en redes de distribución.....	9
2.8.1.	Sobrecarga de transformadores y conductores.....	9
2.8.2.	Caídas y regulación de tensión.....	10
2.8.3.	Calidad de la energía eléctrica.....	10
2.9.	Factor de potencia en redes con alta penetración de VE.....	10
2.10.	Distorsión armónica total (THD) .....	10
2.11.	Herramientas de análisis y simulación .....	11
2.12.	Importancia del análisis integral .....	11
2.13.	Calidad de la energía eléctrica en sistemas de distribución .....	12
2.13.1.	Concepto de calidad de la energía.....	12
2.13.2.	Principales perturbaciones de la calidad de la energía .....	12
2.14.	Fundamentos matemáticos del factor de potencia.....	13
2.14.1.	Definición clásica del factor de potencia .....	13
2.15.	Potencias en sistemas eléctricos.....	13
2.16.	Factor de potencia en presencia de armónicos .....	13

Distorsión armónica total (THD) .....	14
2.16.1. Definición matemática de THD .....	14
2.16.2. Origen de los armónicos en cargadores de vehículos eléctricos .....	14
2.17. Efectos de los armónicos en redes de distribución.....	14
2.18. Justificación del uso de simulación computacional .....	15
2.19. Síntesis del marco teórico .....	15
3. CAPÍTULO III .....	16
3.1. Descripción de la red de distribución residencial.....	16
3.2. Elección y Detalles de red de distribución residencial.....	16
3.2.1. Especificaciones del transformador .....	17
3.2.2. Puntos de carga residenciales instaladas en el transformador .....	18
3.2.3. Vehículo Eléctrico seleccionado.....	19
3.2.4. Cargador eléctrico del VE seleccionado .....	19
3.2.5. Determinación de casos de simulación. ....	20
3.3. Configuración de ETAP .....	20
3.3.1. Configuración de transformador .....	20
3.3.2. Configuración de líneas.....	22
3.3.3. Configuración de cargas .....	24
3.3.4. Configuración de cargas de VE.....	24
3.4. Diagrama unifilar .....	25
3.5. Casos de simulación .....	25
3.5.1. Casos de simulación SIN VE .....	26
3.5.2. Casos de simulación CON VE .....	28
3.5.3. Casos de simulación con filtros armónicos .....	32
3.5.4. Casos de simulación con filtros armónicos cumpliendo IEEE 519 .....	34
4. CAPÍTULO VI.....	38
4.1. Conclusiones .....	38
4.2. Recomendaciones.....	38
REFERENCIAS .....	40

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Espectro de órdenes armónicos de una red de distribución residencial con presencia de vehículos eléctricos.....	5
Figura 2. Estrategias de compensación para mitigar el impacto de los vehículos eléctricos en redes de distribución.....	7
Figura 3. Armónicos característicos presentes en cargadores de vehículos eléctricos.....	11
Figura 4. Pantalla del software ETAP.....	11
Figura 5. Conceptos asociados a la calidad de la energía eléctrica en sistemas de distribución.....	12
Figura 6. Relación entre el triángulo de potencia, el factor de potencia y la distorsión armónica.....	14
Figura 7. Elementos y perturbaciones asociadas a la calidad de la energía eléctrica.....	15
Figura 8. Área de estudio Sector Los Ceibos. Fuente: Google Maps.....	16
Figura 9. Transformador escogido. Fuente: Geo Portal CNEL ep.....	16
Figura 10. Especificaciones de transformador. Fuente: Geo Portal CNEL ep.....	17
Figura 11. Línea de alimentación. Fuente: Geo Portal CNEL ep.....	17
Figura 12. Puntos de carga. Fuente: Geo Portal CNEL ep.....	18
Figura 13. BYD YUAN PRO EV. Fuente: bydauto.ec.....	19
Figura 14. eHOME T2C32. Fuente: circutor.....	20
Figura 15. Parámetros de rating del transformador T1.....	21
Figura 16. Parámetros de Impedancia del Transformador T1.....	21
Figura 17. Parámetros de línea aérea de BT.....	23
Figura 18. Parámetros de línea de área residencial.....	23
Figura 19. Parámetros de cliente.....	24
Figura 20. Parámetros de VE.....	24
Figura 21. Diagrama unifilar de red de distribución.....	25
Figura 22. Simulación de red de distribución de flujo de cargas.....	26
Figura 23. Simulación de red de distribución de flujo de cargas armónicas.....	26
Figura 24. Ondas del flujo de cargas armónicas.....	27
Figura 25. Simulación de red de distribución de flujo de cargas con VE.....	28
Figura 26. Simulación de red de distribución de cargas armónicas con VE.....	29
Figura 27. Ondas de flujo de cargas de armónicos con VE.....	29
Figura 28. Simulación de red de distribución de flujo de cargas armónicas con VE y filtros armónicos.....	30
Figura 29. Análisis de ondas THD de red de distribución con filtros armónicos.....	31
Figura 30. Análisis de ondas YHS de red de distribución con filtros armónicos.....	31
Figura 31. Flujo de cargas con filtro armónico cumpliendo IEEE 519.....	32
Figura 32. Configuración de parámetros en filtro de armónicos.....	33
Figura 33. Flujo de cargas armónicas con filtro armónico cumpliendo IEEE 519.....	33
Figura 34. Configuración de filtro armónico para cumplir con IEEE 519.....	34

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Tabla de usuarios.....	18
Tabla 2. Tabla de conductores y distancias.....	22
Tabla 3. Tabla comparativa de casos.....	35

## RESUMEN

La incorporación de vehículos eléctricos en las redes residenciales está cambiando la forma en que se utiliza la energía eléctrica, a su vez, esto plantea nuevos retos para las redes de distribución. Este trabajo se enfoca en determinar cómo la carga de estos vehículos afecta a una red eléctrica residencial, considerando factores como: el aumento del consumo de potencia, la posible saturación de transformadores, líneas de transmisión, las variaciones de voltaje y las pérdidas de energía. Por eso, se estudian diferentes casos, entre ellos los hábitos de carga de los usuarios, prestando especial atención a los horarios de mayor demanda.

Los resultados evidencian que, si muchos vehículos eléctricos se cargan al mismo tiempo, pueden generarse problemas en la calidad del servicio eléctrico, sobre todo en redes que no fueron diseñadas para soportar este tipo de cargas adicionales. No obstante, el estudio destaca que estos impactos pueden reducirse mediante una adecuada gestión de la carga, el uso de horarios de carga controlados y la modernización de la infraestructura eléctrica.

En conclusión, una planificación oportuna empleando soluciones tecnológicas es vital para asegurar que las redes de distribución residenciales puedan adaptarse de manera segura y confiable al crecimiento de los vehículos eléctricos.

## ABSTRACT

The incorporation of electric vehicles into residential networks is changing the way electrical energy is used, which in turn poses new challenges for distribution networks. This study focuses on determining how charging these vehicles affects a residential electrical network, considering factors such as increased power consumption, possible saturation of transformers and transmission lines, voltage variations, and energy losses. Therefore, different cases are studied, including user charging habits, with special attention to peak demand times.

The results show that if many electric vehicles are charged at the same time, problems in the quality of electrical service can arise, especially in networks that were not designed to support this type of additional load. However, the study highlights that these impacts can be reduced through proper load management, the use of controlled charging schedules, and the modernization of electrical infrastructure.

In conclusion, timely planning using technological solutions is vital to ensure that residential distribution networks can safely and reliably adapt to the growth of electric vehicles.

## ACRÓNIMOS

- V: Voltaje nominal del circuito (V)
- I: Corriente nominal del circuito (A)
- THD: Distorsión armónica total
- R: Resistencia ( $\Omega$ )
- P: Potencia aparente (W)
- kV: Kilovoltios (V)
- kVA: Kilovoltios amperios (VA)
- VE: Vehículos eléctricos
- IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers - Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónico
- 1F: Monofásico
- 3F: Trifásico

## **1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Título**

Determinación del impacto de la carga de vehículos eléctricos en una red de distribución para el sector residencial.

### **1.2. Introducción**

En los últimos años, los vehículos eléctricos han ganado relevancia como una alternativa sostenible frente a los sistemas de transporte tradicionales, impulsando la incorporación de vehículos eléctricos en el sector residencial. Este crecimiento crea nuevos desafíos para las redes de distribución eléctrica, las cuales deberán adaptarse a un aumento significativo, al igual que la demanda energética, debido a la conexión de cargadores de vehículos eléctricos. Estudios realizados en ciudades ecuatorianas, como Guayaquil, evidencian que la implementación de estos sistemas de carga puede generar impactos importantes en la operación de las redes de distribución, afectando niveles de tensión, capacidad de los transformadores y confiabilidad del servicio eléctrico [1], [2]

También, el marco normativo establece criterios técnicos que deben cumplirse para garantizar instalaciones eléctricas seguras y eficientes, lo que resalta la necesidad de evaluar el cumplimiento de dichas normas ante la incorporación de nuevas cargas como los vehículos eléctricos [3]. En esta situación, resulta fundamental determinar el impacto de la carga de vehículos eléctricos en redes de distribución residenciales, considerando tanto aspectos técnicos como normativos, con el fin de proponer soluciones que permitan una integración ordenada, segura y confiable de esta tecnología en el sistema eléctrico.

### **1.3. Planteamiento del problema**

El uso de vehículos eléctricos dentro de los hogares está cambiando de forma progresiva la forma en que se consume la energía eléctrica. La instalación de cargadores residenciales implica una demanda adicional que, cuando se concentra en ciertos horarios del día, puede generar exigencias para las redes de distribución que no fueron consideradas en su diseño original. Investigaciones realizadas en ciudades como Guayaquil muestran que la incorporación de vehículos eléctricos puede provocar un crecimiento significativo de la demanda eléctrica, afectando el desempeño de transformadores, líneas de distribución y los niveles de voltaje del sistema [1].

Ante esta situación, la ausencia de estudios específicos que evalúen el comportamiento de las redes residenciales frente a integración de VE dificulta la toma de decisiones para una adecuada planificación y operación del sistema eléctrico. Por ello, resulta necesario determinar de manera clara el impacto que genera la carga de VE en las redes de distribución del sector residencial, con el propósito de identificar posibles problemas técnicos y aportar criterios que faciliten una integración segura, eficiente y confiable de esta tecnología, tomando como base experiencias previas desarrolladas en el contexto nacional [2].

## **1.4. Justificación**

La transición hacia la electromovilidad en Ecuador requiere más que la simple adquisición de vehículos; exige una planificación energética rigurosa. Realizar un estudio que contemple la proyección de crecimiento del parque automotor eléctrico y sus patrones de consumo es fundamental para anticipar el estrés al que se someterá la red eléctrica.

Este análisis es clave para detectar qué segmentos de la red necesitan modernización antes de que ocurran fallos. El objetivo es proponer soluciones que sean técnicamente viables y sostenibles, minimizando el impacto negativo en la infraestructura existente. Entre las estrategias a considerar se encuentran la gestión activa de la demanda y la mejora de la eficiencia energética [4].

La relevancia de enfrentar este desafío reside en garantizar que la transición hacia la movilidad eléctrica no comprometa la estabilidad del suministro para otros sectores. Igualmente, afrontar estos retos contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y ayuda a alcanzar las metas de sostenibilidad a nivel nacional. En este contexto, estudios como estos son cruciales para impulsar un sistema energético más resiliente y sostenible a futuro [5], [6].

### **1.4.1. Justificación del problema:**

El desarrollo de esta investigación es relevante porque ayuda a determinar los principales impactos que generan la carga de VE en una red residencial urbana.

### **1.4.2. Justificación académica**

El propósito del proyecto es determinar el impacto de VE en una red de distribución residencial, utilizando de manera correcta las normas IEEE mediante pautas de procedimientos sistemáticos.

### **1.4.3. Justificación económica**

La transición hacia la movilidad eléctrica comprende un impacto en la infraestructura existente. Por ello, es necesario determinar los problemas energéticos que se pueda generar en el sector residencial.

### **1.4.4. Justificación social**

Este diseño debe respaldar la seguridad que se debe encontrar en las redes de distribución residenciales.

## **1.5. Delimitación del problema**

Este proyecto está referido dentro del período 2025-2026, tomando como referencia otros proyectos. Entre ello, se consideran los aspectos técnicos, logísticos que son importantes para el respectivo desarrollo y culminación del proyecto. El marco normativo IEEE establece criterios que deberán cumplirse para garantizar instalaciones eléctricas seguras y eficientes. Con el fin de proponer soluciones que permitan una integración ordenada, segura y confiable de esta tecnología en el sistema eléctrico.

El uso del software ETAP permitirá simular y posteriormente validar el comportamiento del modelo. Una vez obtenidos los datos, se realizarán tablas y gráficos para poder observar de manera clara el comportamiento de la red eléctrica.

## **1.6. Beneficiarios del análisis de estudio**

Beneficiarios del proyecto planteado:

### **1.6.1. Comunidad:**

Nuestra investigación contribuye al entendimiento académico y científico referido al campo de la ingeniería eléctrica, refiriéndonos en específico a los problemas que se genera debido a la implementación de vehículos eléctricos en la red eléctrica.

### **1.6.2. Universidad Politécnica Salesiana (UPS):**

La institución académica se beneficiará con la contribución de una investigación que genera un gran impacto e importancia. Esto fortalece el impacto de la investigación actual del impacto de los VE en la infraestructura, fortificando temas en la carrera de electricidad.

## **1.7. Objetivos**

### **1.7.1. Objetivo general**

Evaluar, a través de simulaciones, cómo la carga de vehículos eléctricos afecta una red de distribución, para garantizar un funcionamiento eficiente y sostenible del sistema.

### **1.7.2. Objetivos específicos**

- Simular el funcionamiento de una red de distribución residencial mediante un flujo de carga para identificar el comportamiento del sistema.
- Integrar al sistema de distribución dispositivos de cargas vehiculares mediante aplicación de software obtener los datos de comportamiento.
- Comparar los resultados obtenidos del análisis computacional, mediante tablas y gráficos para identificar el impacto generado por los cargadores de vehículos eléctricos.
- Proponer mejoras y soluciones para reducir los resultados desfavorables en esta red de distribución, integradas en las simulaciones, análisis técnico y la aplicación de métodos de gestión energética, para mejorar el comportamiento del sistema de distribución.

### **1.8. Metodología y equipos**

La investigación adopta un enfoque cuantitativo, descriptivo y experimental, ya que se basa en la modelación y simulación numérica de una red de distribución eléctrica para determinar los efectos técnicos generados por la incorporación de vehículos eléctricos. La investigación busca cuantificar las variaciones en los parámetros eléctricos del sistema bajo distintos casos.

Las técnicas o enfoques para emplear en este proyecto se relacionan con la normativa IEEE para determinar los respectivos parámetros necesarios para nuestro diseño.

Para llevar a cabo la simulación del diseño, utilizamos el software ETAP. Una vez culminado el diseño, determinamos los principales problemas eléctricos y seguidamente verificamos que el diseño cumpla con la norma establecida.

## 2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. Introducción general y justificación académica

La electrificación del transporte constituye uno de los ejes fundamentales de la transición energética a nivel mundial. El incremento sostenido del parque automotor, junto con la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y la dependencia de combustibles fósiles, ha impulsado el desarrollo y la adopción de vehículos eléctricos (VE) como una alternativa tecnológica viable y estratégica [1], [2]. En este escenario, los sistemas eléctricos de potencia enfrentan nuevos desafíos técnicos, operativos y normativos, particularmente en el nivel de distribución, donde se manifiestan de forma directa los efectos de la incorporación de nuevas cargas [3]

Desde una perspectiva académica, el análisis del impacto de los vehículos eléctricos en las redes de distribución se ha convertido en un tema de investigación prioritario, debido a su complejidad multidisciplinaria [4]. Este análisis involucra aspectos relacionados con la ingeniería eléctrica, la electrónica de potencia, la planificación de sistemas eléctricos, la calidad de la energía y la sostenibilidad [5]. En consecuencia, el presente marco teórico tiene como objetivo establecer una base conceptual y técnica sólida que permita comprender en profundidad los fenómenos asociados a la carga masiva de vehículos eléctricos en un alimentador de distribución, tomando como referencia un sector específico de la ciudad de Guayaquil.

A diferencia de estudios previos enfocados exclusivamente en la demanda energética o en la compensación de potencia reactiva, esta investigación adopta un enfoque integral, incorporando el análisis del factor de potencia y de la distorsión armónica total (THD), parámetros fundamentales para evaluar la calidad de la energía y la viabilidad operativa de la red de distribución ante escenarios de alta penetración de VE [6], [8].

En este sentido, la incorporación de vehículos eléctricos en redes de distribución residenciales introduce nuevas componentes armónicas que influyen directamente en la calidad de la energía y en el comportamiento de los transformadores, tal como se ilustra en la figura 1.



Figura 1. Espectro de órdenes armónicos de una red de distribución residencial con presencia de vehículos eléctricos.

## 2.2. Transición energética, sostenibilidad y sistemas eléctricos de potencia

### 2.2.1. Transición energética y descarbonización

La transición energética se define como el proceso de cambio estructural en los sistemas de producción, transporte y consumo de energía, orientado a la reducción del uso de fuentes fósiles y al incremento de fuentes renovables y tecnologías limpias [2]. Este proceso implica no solo modificaciones tecnológicas, sino también transformaciones económicas, regulatorias y sociales. En el sector transporte, la electrificación representa una de las estrategias más efectivas para disminuir las emisiones contaminantes, especialmente en áreas urbanas [1].

La adopción de vehículos eléctricos contribuye a la descarbonización del transporte al desplazar el consumo de combustibles fósiles hacia el uso de energía eléctrica, cuya huella ambiental depende de la matriz de generación del país. No obstante, esta transición traslada parte del impacto energético al sistema eléctrico, generando nuevas exigencias sobre la infraestructura de distribución [3].

Desde un punto de vista cuantitativo, el grado de descarbonización de un sistema energético puede evaluarse mediante el índice de intensidad de carbono [2]:

$$I_{CO_2} = \frac{\text{Emisiones de } CO_2}{\text{Energía consumida}} \quad (1)$$

La electrificación del transporte contribuye a la reducción de este índice cuando la matriz de generación eléctrica presenta una participación significativa de fuentes limpias como la hidráulica, solar o eólica. No obstante, esta reducción ambiental se traduce en una mayor exigencia técnica sobre la infraestructura eléctrica de distribución.

### 2.2.2. Sistemas eléctricos de potencia y su estructura

Un sistema eléctrico de potencia está compuesto por las etapas de generación, transmisión, distribución y utilización de la energía eléctrica [4]. Cada una de estas etapas cumple una función específica, siendo la red de distribución la encargada de suministrar la energía eléctrica a los usuarios finales con niveles adecuados de tensión, continuidad y calidad [3]. La distribución representa el eslabón más cercano al consumidor y, por tanto, el más sensible a las variaciones en la demanda y a la incorporación de nuevas tecnologías [5], [8].

## 2.3. Vehículos eléctricos: fundamentos técnicos

### 2.3.1. Definición y características generales

Un vehículo eléctrico es un medio de transporte que emplea uno o más motores eléctricos para su propulsión, alimentados por energía almacenada en baterías recargables [1]. Los motores eléctricos se caracterizan por su alta eficiencia, elevado par a bajas velocidades y capacidad de control preciso, lo que los convierte en una alternativa superior desde el punto de vista energético frente a los motores de combustión interna [9]

Desde la perspectiva del sistema eléctrico, los vehículos eléctricos introducen una nueva tipología de carga caracterizada por (ver figura 2):

Potencias relativamente altas concentradas en periodos de carga definidos.

- Comportamiento no lineal debido al uso de electrónica de potencia.
- Posibilidad de coincidencia temporal con picos de demanda residencial.



Figura 2. Estrategias de compensación para mitigar el impacto de los vehículos eléctricos en redes de distribución.

- Modelado eléctrico de la carga de un vehículo eléctrico

La potencia media demandada durante la carga se expresa como [9].

$$P_{VE} = \frac{E_{bat}}{t_c} \quad (2)$$

Donde:

$E_{bat}$ : energía almacenada en la batería [kWh]

$t_c$ : tiempo de carga [h]

Para un cargador trifásico, la corriente absorbida se calcula como [4]:

$$I = \frac{P_{VE}}{\sqrt{3} V_L FP} \quad (3)$$

Esta expresión evidencia matemáticamente que una reducción del factor de potencia incrementa la corriente circulante, generando mayores pérdidas y caídas de tensión [3] , [5].

## 2.4. Clasificación de los vehículos eléctricos

### 2.4.1. Vehículos Eléctricos de Batería (BEV)

Los BEV dependen exclusivamente de la energía eléctrica suministrada por la red. La totalidad de su energía de operación se obtiene mediante procesos de carga que pueden realizarse en entornos residenciales, comerciales o estaciones públicas. Debido a su dependencia total de la red, los BEV representan el mayor impacto potencial sobre los alimentadores de distribución.

### Vehículos Híbridos Enchufables (PHEV)

Los PHEV combinan un motor eléctrico con un motor de combustión interna, permitiendo operar en modo eléctrico durante trayectos cortos. Aunque su impacto es menor que el de los BEV, la carga simultánea de múltiples PHEV puede generar efectos significativos en redes urbanas.

### 2.4.2. Vehículos Híbridos Convencionales (HEV)

Los HEV no se conectan a la red eléctrica y, por tanto, no influyen directamente en la demanda del sistema de distribución. Sin embargo, representan una etapa intermedia en la transición hacia la movilidad totalmente eléctrica [22]

## 2.5. Infraestructura de carga de vehículos eléctricos

### 2.5.1. Tipología de sistemas de carga

La infraestructura de carga de vehículos eléctricos se clasifica según la potencia y el tipo de corriente utilizada [2] [9].

**Carga lenta:** Baja potencia, generalmente monofásica, con tiempos de carga prolongados.

$$P \leq 3.7 \text{ kW}$$

**Carga semi rápida:** Potencias medias, comúnmente trifásicas, utilizadas en entornos residenciales y comerciales.

$$3.7 < P \leq 22 \text{ kW}$$

**Carga rápida:** Altas potencias en corriente continua, con impacto significativo sobre la red.

$$P > 50 \text{ kW}$$

## 2.6. Electrónica de potencia asociada a los cargadores

Los cargadores de VE emplean rectificadores controlados, convertidores AC-DC y sistemas de convertidores electrónicos cuyo consumo de corriente no es sinusoidal [6], [1].

$$i(t) \neq I_{max} \sin(\omega t) \quad (4)$$

Estos dispositivos introducen corrientes armónicas y pueden operar con factores de potencia inferiores a la unidad si no se implementan técnicas de corrección activa [4], [8].

## 2.7. Redes de distribución de energía eléctrica

### 2.7.1. Concepto y función

Las redes de distribución tienen como función principal transportar la energía eléctrica desde las subestaciones de transmisión hasta los puntos de consumo final. Su diseño debe garantizar la seguridad, confiabilidad y calidad del suministro, incluso bajo condiciones de carga variable.

### 2.7.2. Planeación y criterios de diseño

La planeación de redes de distribución considera factores como crecimiento de la demanda, diversidad de carga, regulación de tensión y límites térmicos de los equipos. La incorporación de vehículos eléctricos introduce incertidumbre adicional debido a la variabilidad de los patrones de carga.

### 2.7.3. Potencia eléctrica en sistemas de distribución

La potencia compleja que fluye en un sistema eléctrico se expresa como [4], [8], [17]

$$S = P + jQ \quad (5)$$

Donde:

$P$  es la potencia activa [W]

$Q$  es la potencia reactiva [var]

La magnitud de la potencia aparente se calcula como [4]:

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (6)$$

La incorporación de vehículos eléctricos modifica simultáneamente los valores de  $P$  y  $Q$ , afectando la capacidad operativa del alimentador.

## 2.8. Impacto de los vehículos eléctricos en redes de distribución

### 2.8.1. Sobrecarga de transformadores y conductores

La carga simultánea de vehículos eléctricos puede provocar que transformadores y líneas operen por encima de su capacidad nominal, generando sobrecalentamiento y envejecimiento acelerado del aislamiento [3] [9]

El envejecimiento térmico del aislamiento del transformador sigue una relación exponencial [8]:

$$\text{Vida útil} \propto e^{-\alpha(T-T_{ref})} \quad (7)$$

Lo que demuestra que pequeñas elevaciones de temperatura reducen significativamente la vida útil del equipo.

### 2.8.2. Caídas y regulación de tensión

El incremento de la demanda provoca mayores caídas de tensión a lo largo de los alimentadores, pudiendo generar incumplimientos normativos y afectar la calidad del servicio.

La caída de tensión en un tramo de línea se expresa como [8]:

$$\Delta V = I(R \cos \varphi + X \sin \varphi) \quad (8)$$

El incremento de corriente debido a la carga simultánea de vehículos eléctricos incrementa directamente este valor.

### 2.8.3. Calidad de la energía eléctrica

La calidad de la energía se ve afectada por la presencia de armónicos, fluctuaciones de tensión y desequilibrios, fenómenos que pueden intensificarse con la integración de cargadores de VE.

## 2.9. Factor de potencia en redes con alta penetración de VE

El factor de potencia mide la eficiencia con la que se utiliza la energía eléctrica. Valores bajos incrementan las pérdidas y reducen la capacidad disponible del sistema [4] [9] Los cargadores de VE pueden afectar negativamente este parámetro, haciendo necesaria la implementación de estrategias de compensación.

Definición clásica del factor de potencia [4].

$$FP = \cos (\varphi) \quad (9)$$

Factor de potencia en presencia de armónicos [6], [7].

$$FP_{total} = \cos (\varphi_1) \cdot \frac{1}{\sqrt{1+THD_I^2}} \quad (10)$$

## 2.10. Distorsión armónica total (THD)

La distorsión armónica total cuantifica el contenido armónico presente en una señal eléctrica. Valores elevados de THD pueden generar sobrecalentamiento, resonancias y fallas prematuras en equipos eléctricos [28], [22]

Definición matemática [8]:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_1} \quad (11)$$

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n V_h^2}}{V_1} \quad (12)$$

## Armónicos característicos en cargadores de VE

Como nos indica la figura 3, los armónicos predominantes son de orden 5°, 7°, 11° y 13° [22], [26].

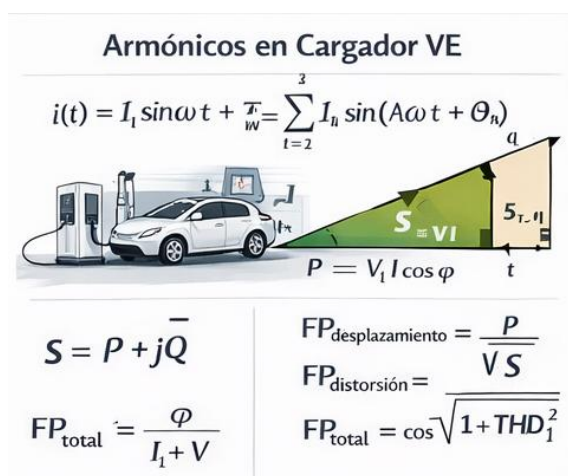


Figura 3. Armónicos característicos presentes en cargadores de vehículos eléctricos.

## 2.11. Herramientas de análisis y simulación

9.1 El software ETAP es una herramienta avanzada y flexible, empleada globalmente para el análisis y el estudio de sistemas eléctricos como nos indica la figura 4 [17].



Figura 41: Pantalla del Software ETAP

## 2.12. Importancia del análisis integral

El análisis integral del impacto de los vehículos eléctricos en redes de distribución es esencial para garantizar una transición ordenada hacia la movilidad eléctrica. La evaluación conjunta de sobrecarga, regulación de tensión, factor de potencia y distorsión armónica permite identificar limitaciones técnicas y proponer soluciones que aseguren la confiabilidad y sostenibilidad del sistema eléctrico.

## 2.13. Calidad de la energía eléctrica en sistemas de distribución

### 2.13.1. Concepto de calidad de la energía

La calidad de la energía eléctrica se define como el grado en que las características de la tensión, la corriente y la frecuencia de un sistema eléctrico se mantienen dentro de los límites establecidos por normas técnicas, de modo que los equipos conectados puedan operar correctamente sin degradación de desempeño ni reducción de su vida útil. En redes de distribución modernas, la calidad de la energía se ha convertido en un parámetro crítico debido a la proliferación de cargas electrónicas y no lineales, entre las cuales se destacan los cargadores de vehículos eléctricos como refleja la figura 5.

Una red con adecuada calidad de energía debe presentar formas de onda sinusoidales, tensiones equilibradas entre fases, frecuencia estable y ausencia de perturbaciones severas. La desviación de estas condiciones ideales da lugar a fenómenos que afectan tanto a los usuarios finales como a la infraestructura eléctrica.



Figura 5. Conceptos asociados a la calidad de la energía eléctrica en sistemas de distribución.

### 2.13.2. Principales perturbaciones de la calidad de la energía

Las perturbaciones más relevantes en redes de distribución incluyen:

Variaciones de tensión de corta y larga duración.

Hundimientos y elevaciones de tensión.

Distorsión armónica de corriente y tensión.

Desequilibrios de fase.

Flicker o parpadeo luminoso.

La integración de vehículos eléctricos incide principalmente en la distorsión armónica y en las variaciones de tensión, debido a la naturaleza electrónica de los cargadores y a la concentración temporal de la demanda.

## 2.14. Fundamentos matemáticos del factor de potencia

### 2.14.1. Definición clásica del factor de potencia

En sistemas sinusoidales lineales, el factor de potencia (FP) se define como el coseno del ángulo de desfase entre la tensión y la corriente fundamental:

$$FP = \cos(\varphi) \quad (13)$$

Este parámetro indica qué fracción de la potencia aparente se transforma efectivamente en potencia activa útil. Valores cercanos a la unidad implican un uso eficiente de la energía eléctrica, mientras que valores bajos indican una mayor circulación de potencia reactiva.

## 2.15. Potencias en sistemas eléctricos

La potencia aparente  $S$  se expresa como [4]:

$$S = V_{\text{rms}} \times I_{\text{rms}} \quad (14)$$

La potencia activa  $P$  se define como [4]:

$$P = V_{\text{rms}} \times I_{\text{rms}} \times \cos(\varphi) \quad (15)$$

La potencia reactiva  $Q$  se expresa como [4]:

$$Q = V_{\text{rms}} \times I_{\text{rms}} \times \sin(\varphi) \quad (16)$$

En redes de distribución, un bajo factor de potencia incrementa las pérdidas por efecto Joule y reduce la capacidad disponible de transformadores y conductores.

## 2.16. Factor de potencia en presencia de armónicos

Cuando existen armónicos, el factor de potencia total no depende únicamente del desfase angular, sino también de la distorsión de la corriente. En este caso, el factor de potencia total puede expresarse como [6], [8]:

$$FP_{\text{total}} = FP_{\text{desplazamiento}} \times FP_{\text{distorsión}} \quad (17)$$

Donde el factor de potencia por distorsión se relaciona con el THD de corriente según [6]:

$$FP_{\text{distorsión}} = 1 / \sqrt{1 + THD_I^2} \quad (18)$$

Esto demuestra que incluso con un ángulo de desfase pequeño, la presencia de armónicos puede reducir significativamente el factor de potencia total del alimentador, como en la figura 6.

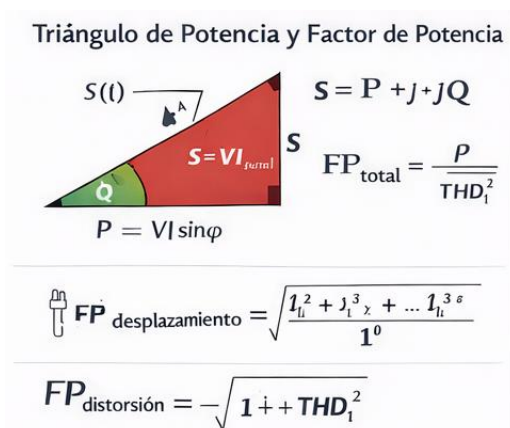


Figura 6. Relación entre el triángulo de potencia, el factor de potencia y la distorsión armónica.

## Distorsión armónica total (THD)

### 2.16.1. Definición matemática de THD

La distorsión armónica total de corriente se define como:

$$THD\_I = \sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2)} / I_1 \quad (19)$$

De manera análoga, la distorsión armónica total de tensión se expresa como:

$$THD\_V = \sqrt{(V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2)} / V_1 \quad (20)$$

Donde  $I_1$  y  $V_1$  representan la componente fundamental de la corriente y la tensión, respectivamente

### 2.16.2. Origen de los armónicos en cargadores de vehículos eléctricos

Los cargadores de vehículos eléctricos emplean rectificadores controlados y convertidores electrónicos que absorben corriente de forma no sinusoidal. Esta corriente distorsionada se traduce en armónicos que se propagan por el sistema de distribución, afectando a otros usuarios conectados al mismo alimentador.

Los armónicos más comunes asociados a rectificadores trifásicos son los de orden 5, 7, 11 y 13, los cuales pueden generar efectos acumulativos cuando múltiples cargadores operan simultáneamente, como en la figura 7

## 2.17. Efectos de los armónicos en redes de distribución

La presencia de armónicos produce diversos efectos adversos, entre los cuales se destacan:

Incremento de pérdidas en transformadores y conductores.

- Sobrecalentamiento de núcleos magnéticos.
- Disparo intempestivo de protecciones.

- Interferencia con equipos sensibles.
- Riesgo de resonancia serie o paralela.

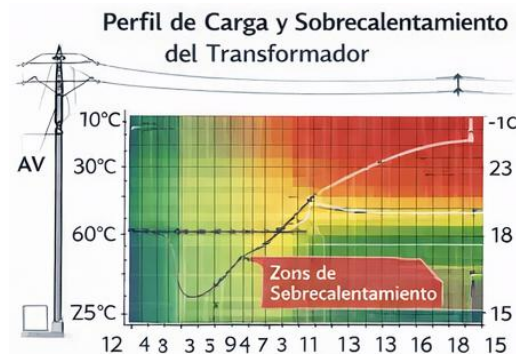


Figura 7. Elementos y perturbaciones asociadas a la calidad de la energía eléctrica.

- 14. Marco normativo aplicable a calidad de energía

Las normas técnicas establecen límites máximos permitidos para la distorsión armónica y el factor de potencia en sistemas eléctricos [3], [8]. Entre las más relevantes se encuentran:

IEEE 519: Establece límites de THD de corriente y tensión en el punto de acoplamiento común.

Normas IEC relacionadas con compatibilidad electromagnética.

Regulaciones locales de calidad de energía aplicables a redes de distribución.

El cumplimiento de estas normas es fundamental para garantizar la operación segura y confiable del sistema eléctrico [8]:

## 2.18. Justificación del uso de simulación computacional

El análisis analítico de redes de distribución con alta penetración de vehículos eléctricos resulta complejo debido a la naturaleza no lineal de las cargas y a la interacción entre múltiples variables. Por esta razón, el uso de herramientas de simulación como ETAP que permite modelar con precisión el comportamiento del sistema, evaluar escenarios futuros y validar el cumplimiento de criterios técnicos y normativos [17].

## 2.19. Síntesis del marco teórico

El marco teórico desarrollado proporciona una base conceptual, técnica y matemática sólida para el análisis del impacto de la carga de vehículos eléctricos en redes de distribución. La integración de conceptos de calidad de energía, factor de potencia, distorsión armónica y normativa permite sustentar académicamente la metodología y los resultados del presente proyecto, asegurando su coherencia y relevancia en el contexto de la ingeniería eléctrica moderna.

### 3. CAPÍTULO III

#### 3.1. Descripción de la red de distribución residencial

Para determinar el efecto de la integración de carga de los VE, se ha seleccionado una zona específica de estudio, en este caso se seleccionó el sector Los Ceibos como se muestra en la figura 8, barrio residencial ubicado al norte de la ciudad de Guayaquil

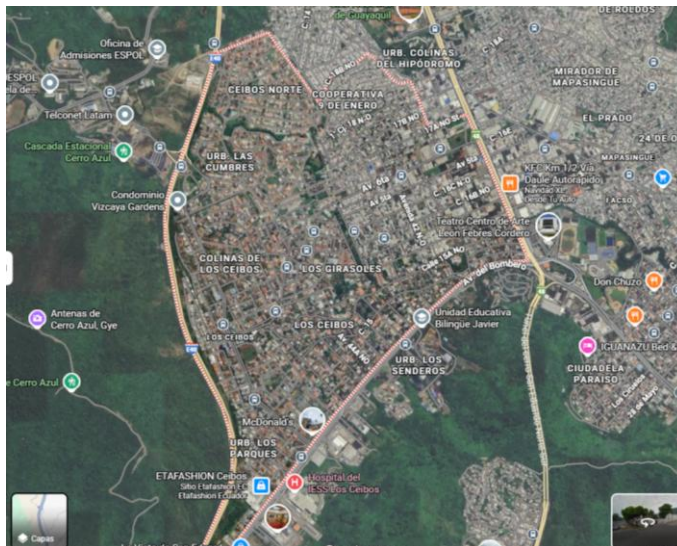


Figura 8: Área de estudio Sector Los Ceibos.  
Fuente: Google maps.

#### 3.2. Elección y Detalles de red de distribución residencial

Para este estudio se tomó un transformador de código 13/32610 junto con sus diferentes cargas, estos datos serán tomados de Geoportal de CNEL EP como se muestra en la figura 9. Esta opción nos permitirá realizar los distintos tipos de simulación sobre las cargas y la capacidad del transformador para determinar el impacto de esta investigación.

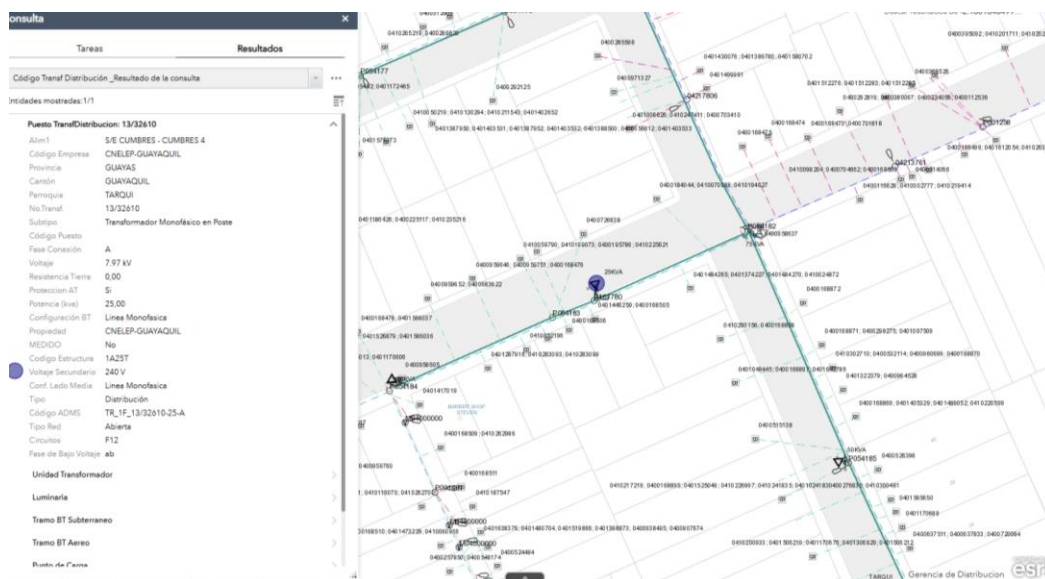


Figura 9: Transformador escogido  
Fuente: Geo portal Cnel ep.

### 3.2.1. Especificaciones del transformador

El transformador tiene una capacidad de 25kVA y es alimentado por Tramo MTA de 7.97 kV con calibre ACSR 1/0 como se muestra en la figura 10.

Puesto TransfDistribucion: 13/32610	
Alim1	S/E CUMBRES - CUMBRES 4
Código Empresa	CNELEP-GUAYAQUIL
Provincia	GUAYAS
Cantón	GUAYAQUIL
Parroquia	TARQUI
No.Transf.	13/32610
Subtipo	Transformador Monofásico en Poste
Código Puesto	
Fase Conexión	A
Voltaje	7.97 kV
Resistencia Tierra	0,00
Proteccion AT	Si
Potencia (kva)	25,00
Configuración BT	Línea Monofasica
Propiedad	CNELEP-GUAYAQUIL
MEDIDO	No
Código Estructura	1A25T
Voltaje Secundario	240 V
Conf. Lado Media	Línea Monofasica
Tipo	Distribución
Código ADMS	TR_1F_13/32610-25-A
Tipo Red	Abierta
Circuitos	F12
Fase de Bajo Voltaje	ab

*Figura 10: Especificación de transformador  
Fuente: Geo portal Cnel ep.*

En la figura 11 se muestra las especificaciones del tramo Aéreo de la red de media tensión con estos datos se puede simular el ramal de alta tensión.

Tramo MT Aereo: S/E CUMBRES - CUMBRES 4	
Alim1	S/E CUMBRES - CUMBRES 4
Código Empresa	CNELEP-GUAYAQUIL
Subtipo	Tramo MTA Monofasico
Fase Conexion	A
Voltaje	7.97 kV
Código Conductor Fase	ACSR.2
Código Conductor Neutro	
Configuracion Conductores	1F1C
Secuencia Fase	A
Ramal	Ramal
Provincia	GUAYAS
Cantón	GUAYAQUIL
Parroquia	TARQUI

*Figura 11: Línea de alimentación  
Fuente: Geo portal Cnel ep.*

### 3.2.2. Puntos de carga residenciales instaladas en el transformador

Según Geoportal este transformador alimenta a 12 usuarios como se muestra en la figura 11 de categoría residencial dando un consumo promedio anual de cada usuario.

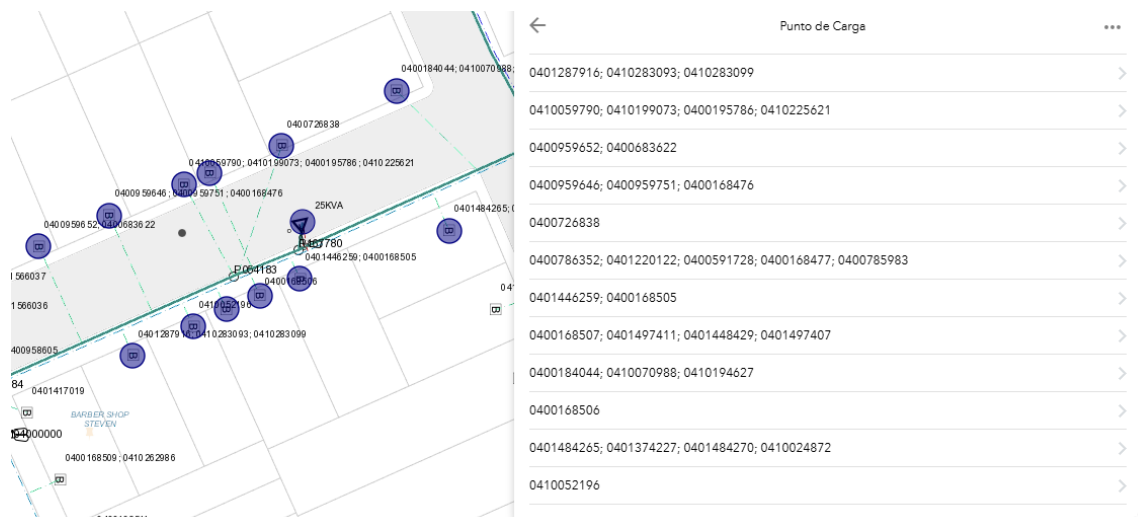


Figura 12: Puntos de carga  
Fuente: Geo portal Cnel ep.

La siguiente tabla muestra los consumos de los diferentes usuarios de este transformador:

Cliente	Consumo (kWh)	Potencia Media (kW)	Potencia Media (W)	Potencia Aparente (kVA)	Corriente (A)
1	317.07	0.44	440	0.98	4.08
2	440.62	0.61	610	1.36	5.67
3	424.08	0.59	590	1.31	5.46
4	847.9	1.18	1180	2.62	10.91
5	169.69	0.24	240	0.52	2.18
6	1080.16	1.5	1500	3.33	13.9
7	744	1.03	1030	2.3	9.57
8	317.07	0.44	440	0.98	4.08
9	230.08	0.32	320	0.71	2.96
10	421.77	0.59	590	1.3	5.42
11	2827.67	3.93	3930	8.73	36.36
12	275.39	0.38	380	0.85	3.54

Tabla 1: Tabla de usuarios

También a este transformador tiene instalada dos iluminarias de 150w con un voltaje de 220v.

### 3.2.3. Vehículo Eléctrico seleccionado

El modelo que se tomará de referencia para la simulación será el BYD YUAN PRO-EV como se muestra en la figura 13 siendo el VE más usado en Ecuador destacado por su relación calidad-precio y autonomía.

- Autonomía: Ofrece una autonomía aproximadamente de 300-320 km
- Capacidad de la Batería: 45.12kWh
- Tiempo de carga: 7 a 8 horas si usamos su carga residencial de tipo Wallbox de 7kW (0 – 100%)
- Consumo energético: Su eficiencia energética promedio es de aproximadamente 12.5 a 13.5 kWh por cada 100 km recorridos en ciclos mixtos.
- Rendimiento del motor: Cuenta con una potencia de 70 kW (94 hp) y un torque instantáneo de 180 Nm, lo que le permite una aceleración de 0 a 50 km/h en 3.9 segundos.



*Figura 13: BYD YUAN PRO EV  
Fuente: bydauto ec*

### 3.2.4. Cargador eléctrico del VE seleccionado

El modelo escogido será el **eHome T2C32** como se muestra en la figura 14, este cargador es adecuado para nuestra simulación ya que es perfecta para lo que son redes residenciales y nuestro VE.

Características eléctricas:

- Potencia máx. de salida: 7.4kW
- I.max de salida: 32 A
- V. operación: 230V AC
- Conector: Cable Tipo 2
- Modo de carga: Modo 3
- Dimensiones: 315x180x110 mm
- Tipo de red: Monofásico
- Números de tomas: 1



Figura 14: eHOME T2C32  
Fuente: circutor

### 3.2.5. Determinación de casos de simulación.

Para poder determinar el impacto que tiene el ingreso masivo de vehículos eléctricos se pensara el peor de los casos donde tanto las cargas residenciales y las cargas de VE se encuentre en uso al mismo tiempo. Esto permitirá ver un consumo máximo de esta red de distribución tomada como ejemplo permitiendo ver el límite y las posibles consecuencias que estas cargas generen en la red de distribución.

Para estas simulaciones se harán 3 casos diferentes:

Caso 1: Red de distribución sin carga de vehículos eléctricos

Caso 2: Red de distribución con carga de vehículos eléctricos.

Caso 3: Posible solución y mejora para esta red de distribución.

## 3.3. Configuración de ETAP

Se empleará la aplicación ETAP que es un programa de simulación de flujo de carga para diseñar y simular redes eléctricas, proporcionando análisis y representaciones visuales de los resultados lo que ayuda a la detección de problemas y realizar soluciones eficientes.

### 3.3.1. Configuración de transformador

Los datos se utilizarán en el transformador serán los mismos que proporciona el Geoportal CNEL EP y se colocarán en el software etapa como se muestra en la figura 15 y 16.

2-Winding Transformer Editor - T1

Hammonic Reliability Magnetization Remarks Comment  
Info Rating Impedance Tap Grounding Sizing Protection

25 kVA ANSI Liquid-Fill Other 65 C 7.97 0.24 kV

Voltage Rating

	kV	FLA	Nominal Bus kV
Prim.	7.97	1.811	7.97
Sec.	0.24	60.14	0.24

Other 65

Z Base

kVA  
25

Power Rating

kVA

Rated 25

Other 65

Derated 25

% Derating 0

MFR

Alert - Max

kVA  
25

Derated kVA  
 User-Defined

Installation

Altitude  
3300 ft

Ambient Temp.  
30 °C

Type / Class

Type	Sub Type	Class	Temp. Rise
Liquid-Fill	Other	Other	65

OK Cancel

Figura 15: parámetros de rating del transformador T1

Se realizó las distintas configuraciones del transformador uno ubicando los parámetros de impedancia, como indica en la figura 16.

2-Winding Transformer Editor - T1

Hammonic Reliability Magnetization Remarks Comment  
Info Rating Impedance Tap Grounding Sizing Protection

25 kVA ANSI Liquid-Fill Other 65 C 7.97 0.24 kV

Impedance

	%Z	X/R	R/X	%X	%R
Positive	2.3	1.13	0.885	1.722	1.524
Zero	2.3	1.13	0.885	1.722	1.524

Typical Z & X/R Typical X/R

Z Variation

@	% Tap	%Z	% Z Variation
-5	% Tap	2.3	0
5	% Tap	2.3	0

Z Tolerance

+ 0 %

No Load Data (Unbalanced and Transient Stability Analyses)

	% FLA	kW	% G	% B
Positive	0	0	0	0
Zero	0	0	0	0

Buried Delta Winding Zero Seq. Impedance Typical Value

OK Cancel

Figura 16: parámetros de impedancia del transformador T1

### 3.3.2. Configuración de líneas

Los datos que se utilizarán en las líneas aéreas de BT serán los mismos que proporciona el Geoportal CNEL EP, estos datos fueron separados y colocados en la tabla 2.

	DESDE	HASTA	CONDUCTOR	DISTANCIA
<b>TRANSFORMADOR</b>	transformador 1	punto de fuga	TW.AL.4/0	3.5
<b>L1</b>	PL9	LUMINARIA 1	TW.Cu.4	7.58
<b>L1</b>	LUMINARIA 1	L1	TW.Cu.12	2
<b>L2</b>	punto de fuga	L2	TW.Cu.12	2
<b>CLIENTE 11</b>	punto de fuga	PL11	TW.Cu.4	18
<b>CLIENTE 11</b>	PL11	cliente 11	MUL.AL.3x4	4.33
<b>CLIENTE 9</b>	punto de fuga	PL9	TW.Cu.4	25.4
<b>CLIENTE 9</b>	PL9	CLIENTE 9	MUL.AL.3x4	13.8
<b>CLIENTE 7</b>	punto de fuga	PL7	TW.Cu.4	2.2
<b>CLIENTE 7</b>	PL7	CLIENTE 7	MUL.AL.3x4	2.5
<b>CLIENTE 6</b>	punto de fuga	PL6	TW.Cu.4	8
<b>CLIENTE 6</b>	PL6	CLIENTE 6	MUL.AL.3x4	13.5
<b>CLIENTE 10</b>	PL6	CLIENTE 10	MUL.AL.3x4	2.25
<b>CLIENTE 5</b>	PL6	PL5	TW.Cu.4	2.25
<b>CLIENTE 5</b>	PL5	CLIENTE 5	MUL.AL.3x4	17.8
<b>CLIENTE 2</b>	PL5	CLIENTE 2	MUL.AL.3x4	14
<b>CLIENTE 8</b>	PL5	PL8	TW.Cu.4	2.5
<b>CLIENTE 8</b>	PL8	CLIENTE 8	MUL.AL.3x4	5
<b>CLIENTE 12</b>	PL8	PL12	TW.Cu.4	5.2
<b>CLIENTE 12</b>	PL12	CLIENTE 12	MUL.AL.3x4	3
<b>CLIENTE 4</b>	PL12	PL4	TW.Cu.4	3,2
<b>CLIENTE 4</b>	PL4	CLIENTE 4	MUL.AL.3x4	13.6
<b>CLIENTE 1</b>	PL4	PL1	TW.Cu.4	4.7
<b>CLIENTE 1</b>	PL1	CLIENTE 1	MUL.AL.3x4	3.2
<b>CLIENTE 3</b>	PL1	PL3	TW.Cu.4	5.15
<b>CLIENTE 3</b>	PL3	CLIENTE 3	MUL.AL.3x4	13

Tabla 2: Tabla de conductores y distancias

En el Programa ETAP se configurará dependiendo de la tabla de distancias y conductores para tener una simulación lo más realista posible como se muestra en la figura 17 y 18.

The screenshot shows the 'Cable Editor - LR11' window. At the top, there are tabs for 'Sizing - Phase', 'Sizing - GND/PE', 'Reliability', 'Routing', 'Remarks', and 'Comment'. Below these are sub-tabs for 'Info', 'Physical', 'Impedance', 'Configuration', 'Loading', 'Capacity', and 'Protection'. The main area contains several sections:

- Table:**

NEC	Mag.	60 Hz	Code : 4
Rubber	100 %	0.6 kV	3/C AL 4 AWG/kcmil
- Info:** ID: LR11; From: PL11 (0.24 kV); To: Bus4 (0.24 kV); Revision Data: Base.
- Equipment:** Tag #, Name, and Description fields.
- Condition:** Service: In (selected), Out; State: As-Built; No. of Conductors/Phase: 1.
- Length:** Length: 4.33 m; Tolerance: 0 %.
- Library:** Library... button; Link to Library checkbox.
- Connection:** 3 Phase (selected), 1 Phase.

At the bottom, there are navigation icons, a dropdown menu showing 'LR11', and 'OK' and 'Cancel' buttons.

Figura 17: parámetros de línea aérea de BT

En la figura 18 se muestra la disposición de los principales puntos de línea residencial dándole ajuste a la red.

The screenshot shows the 'Cable Editor - LA11' window. It has the same layout as Figure 17. The main area contains several sections:

- Table:**

NEC	Mag.	60 Hz	Code : 4
Rubber	100 %	0.6 kV	3/C CU 4 AWG/kcmil
- Info:** ID: LA11; From: LINEA DE BAJA (0.24 kV); To: PL11 (0.24 kV); Revision Data: Base.
- Equipment:** Tag #, Name, and Description fields.
- Condition:** Service: In (selected), Out; State: As-Built; No. of Conductors/Phase: 1.
- Length:** Length: 19 m; Tolerance: 0 %.
- Library:** Library... button; Link to Library checkbox.
- Connection:** 3 Phase (selected), 1 Phase.

At the bottom, there are navigation icons, a dropdown menu showing 'LA11', and 'OK' and 'Cancel' buttons.

Figura 18: parámetros de línea de aérea residencial

### 3.3.3. Configuración de cargas

Los datos que se utilizarán en las cargas residenciales serán los mismos que proporciona el Geoportal CNEL EP y serán colocados en el software etapa como se muestra en la figura 19.

Static Load Editor - U1

Reliability: Info Loading Cable/Vd Cable/Amp Time Domain Harmonic

Remarks: Cable Info not available

Comment: Cable Info not available

1 435.6 W 62.07 var 0.24 kV

Ratings

kV VA W var % PF Amps Grounding

0.24 440 435.6 62.07 99 1.06

Calculator...

Loading

	Loading		Load		Feeder Loss	
	Category	%	W	var	W	var
1	Design	100	435.6	62.07	0	0
2	Normal	100	435.6	62.07	0	0
3	Brake	0	0	0	0	0
4	Winter Load	0	0	0	0	0
5	Summer Load	0	0	0	0	0
6	FL Reject	0	0	0	0	0
7	Emergency	0	0	0	0	0
8	Shutdown	0	0	0	0	0
9	Accident	0	0	0	0	0

Operating Load: 0 W +j 0 var

U1

Figura 19: parámetros de cliente

### 3.3.4. Configuración de cargas de VE

Los datos que se utilizarán en las cargas de Vehículos Eléctricos serán los mismos que proporciona las especificaciones del vehículo eléctrico escogido y se colocara en el software etapa como se muestra en la figura 20.

Lumped Load Editor - vehiculos electricos

Info Nameplate Short-Circuit Dyn Model Time Domain Reliability Remarks Comment

7 kVA 0.24 kV (80% Motor 20% Static)

Info

ID vehiculos electricos

Bus Bus3 0.24 kV

Equipment

Tag #

Name

Description

Data Type Estimated

Priority Other

Load Type Other

Demand Factor

Continuous Intermittent Spare

100 50 0 %

Revision Data

Base

Condition

Service  In  Out

State As-Built

Configuration

Normal

Status Continuous

Connection

3 Phase  1 Phase A

Reference kV

Calculated  User-Defined kV

0

vehiculos electricos

Figura 20: parámetros de VE

### 3.4. Diagrama unifilar

Una vez colocado los datos y parámetros en el software etapa se conectará los equipos y conexiones para simular la red residencial como se muestra en la figura 21.

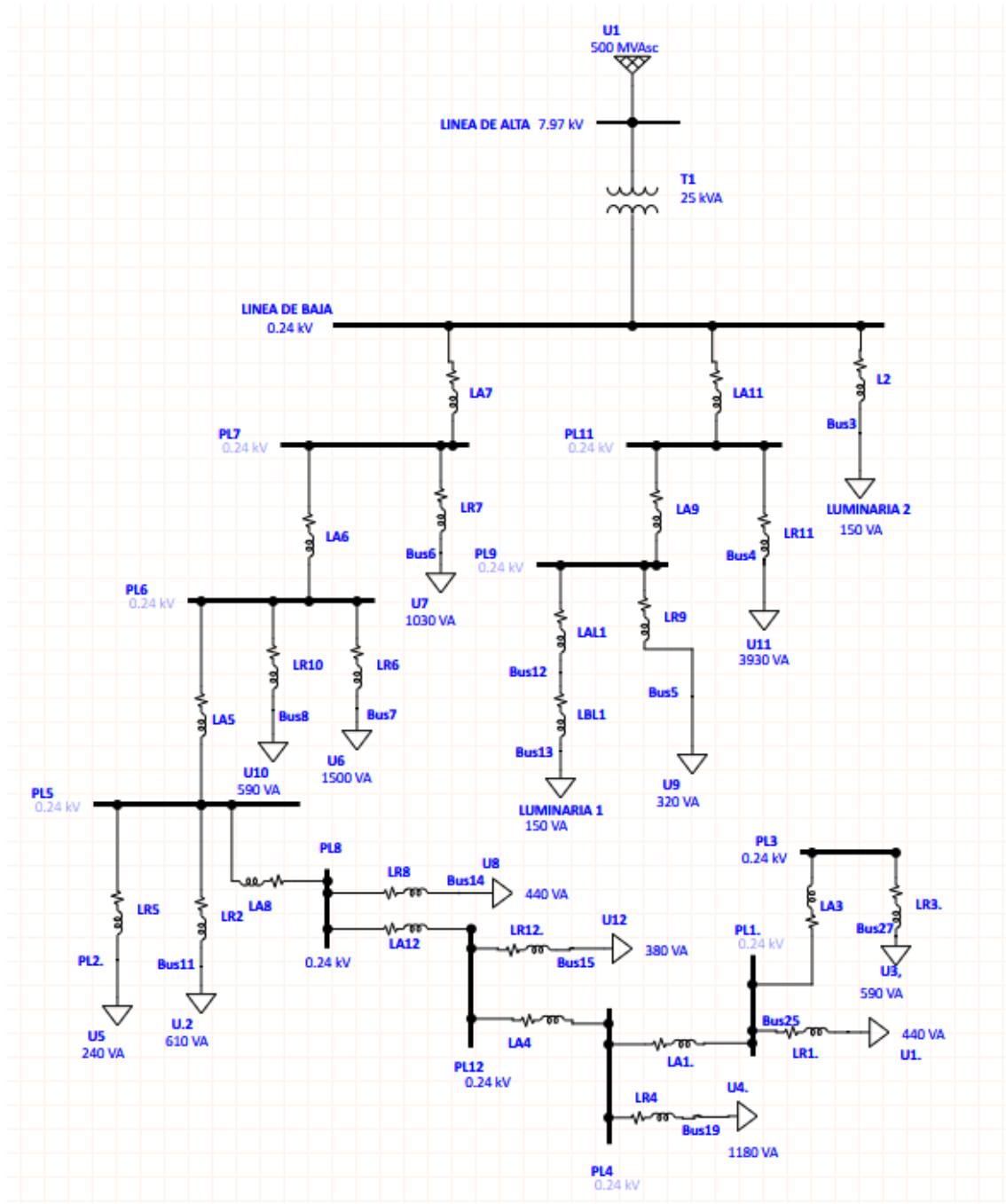


Figura 21: Diagrama unifilar de red de distribución

### 3.5. Casos de simulación

Para poder determinar cómo afecta la carga de vehículos eléctricos en la red de distribución residencial se decidió simular diferentes casos para ver las diferencias con claridad a continuación detallan cada uno de ellos.



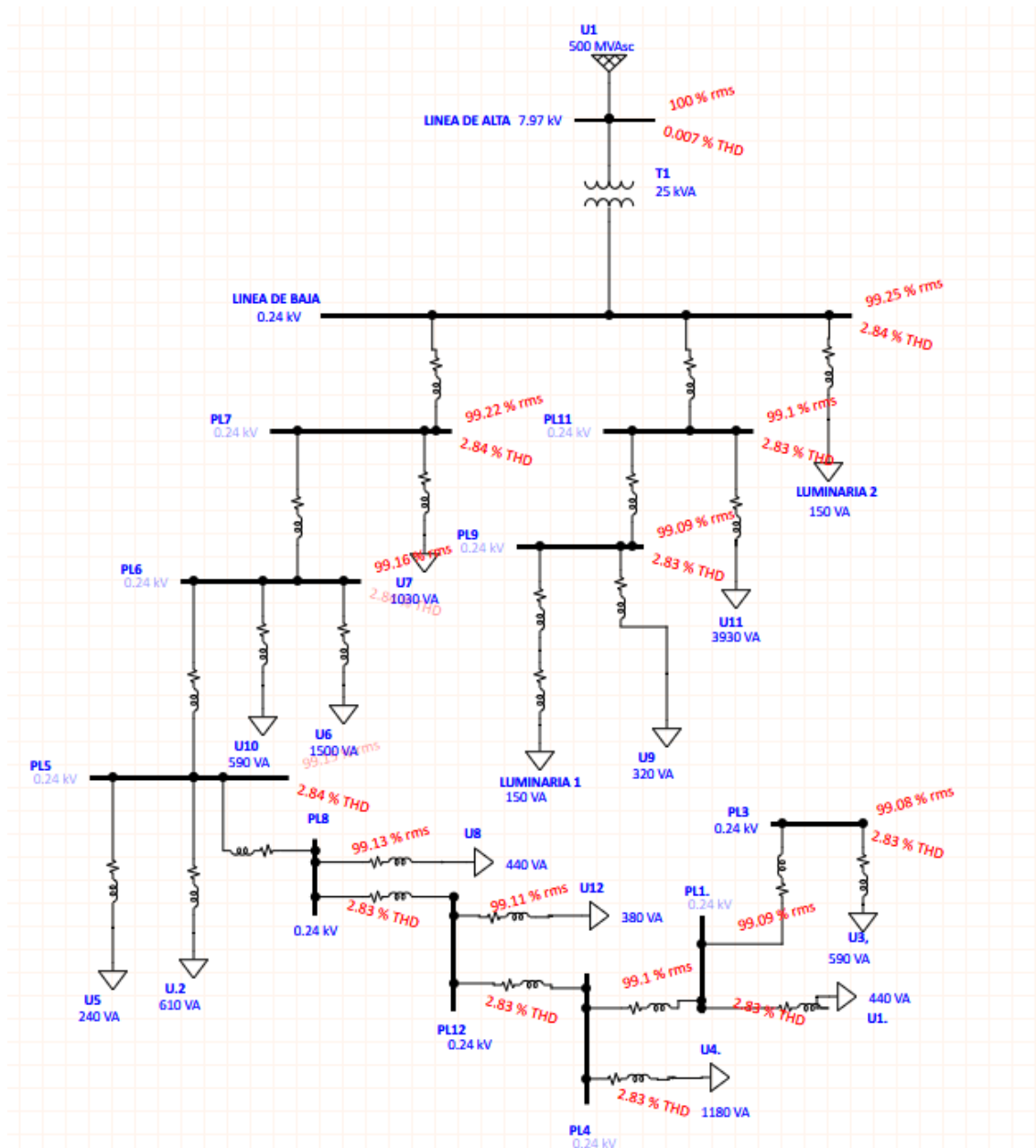


Figura 23: Simulación de red de distribución flujo de cargas armónicas

En este escenario base, la red opera únicamente con las cargas residenciales y las luminarias públicas. Los resultados muestran:

- El transformador trabaja dentro de su capacidad nominal.
- Las corrientes en las líneas se mantienen en niveles seguros.
- La distorsión armónica total de voltaje (THD) es baja.
- El espectro armónico presenta niveles reducidos de armónicos individuales.

Este caso sirve como referencia técnica, ya que representa el comportamiento normal de la red sin la influencia de nuevas cargas no lineales como se muestra en la figura 24.

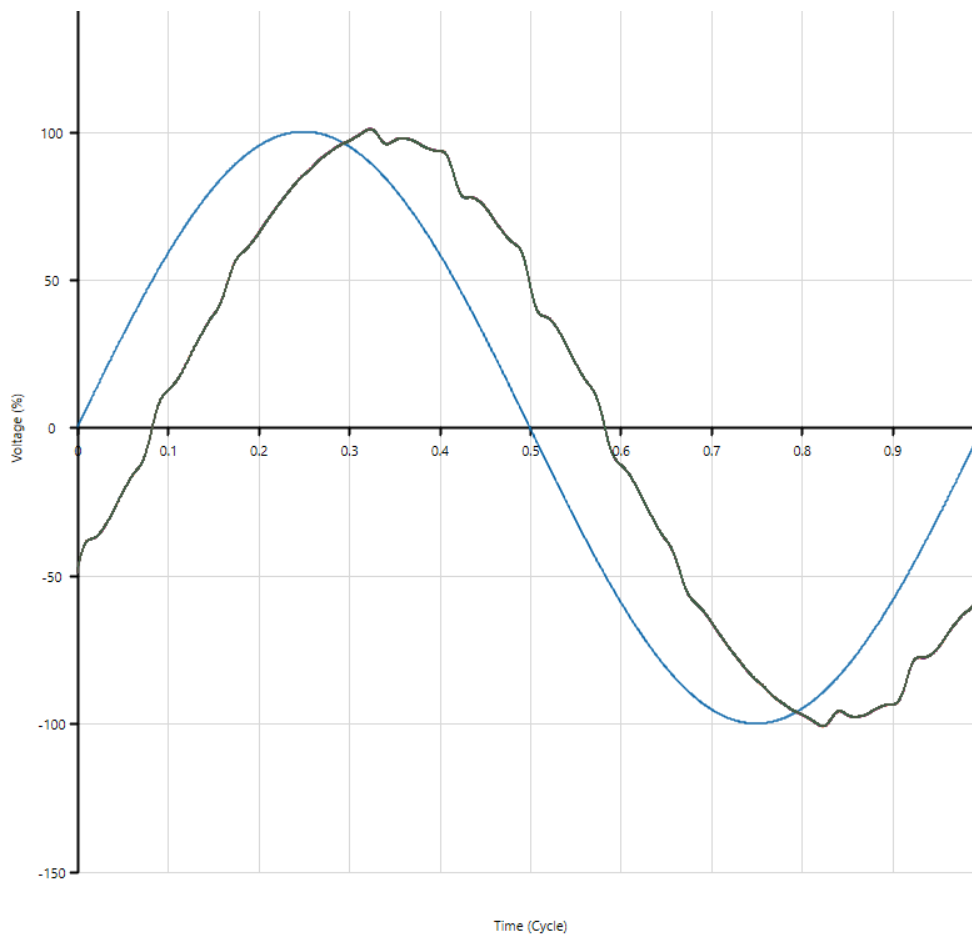


Figura 24: Ondas del flujo de cargas armónicas

### 3.5.2. Casos de simulación CON VE

En el segundo caso se simula la red residencial con dos VE, estos vehículos eléctricos fueron colocados en paralelo del cliente 11 y cliente 9 como se muestra en la figura 25.

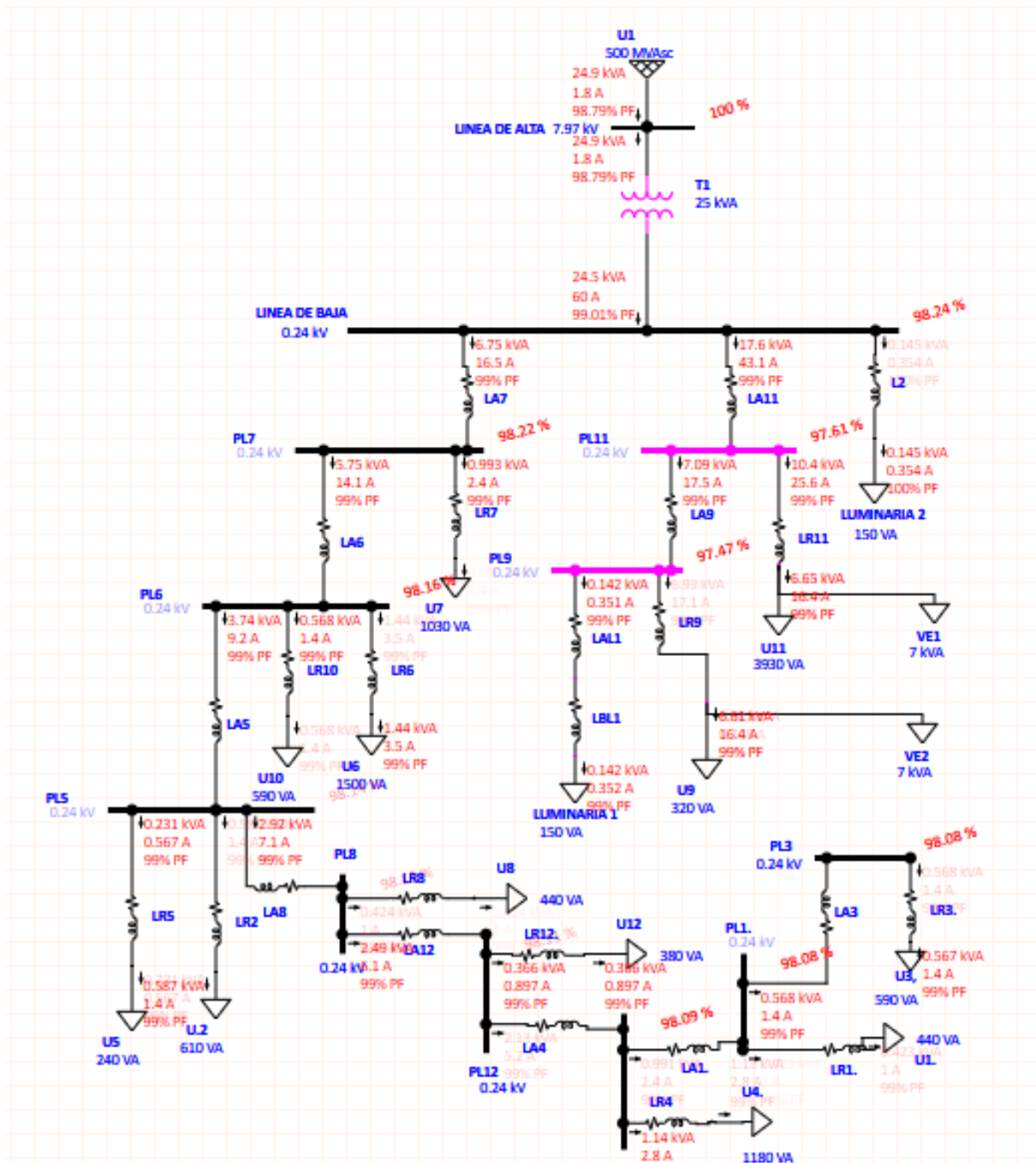


Figura 25: Simulación de red de distribución flujo de cargas con VE

Se puede visualizar como en la figura 25 el transformador no tiene la capacidad suficiente para alimentar estas dos cargas sin embargo para efectos de simulación dejaremos esas cargas iguales y veremos cómo actúa la red urbana.

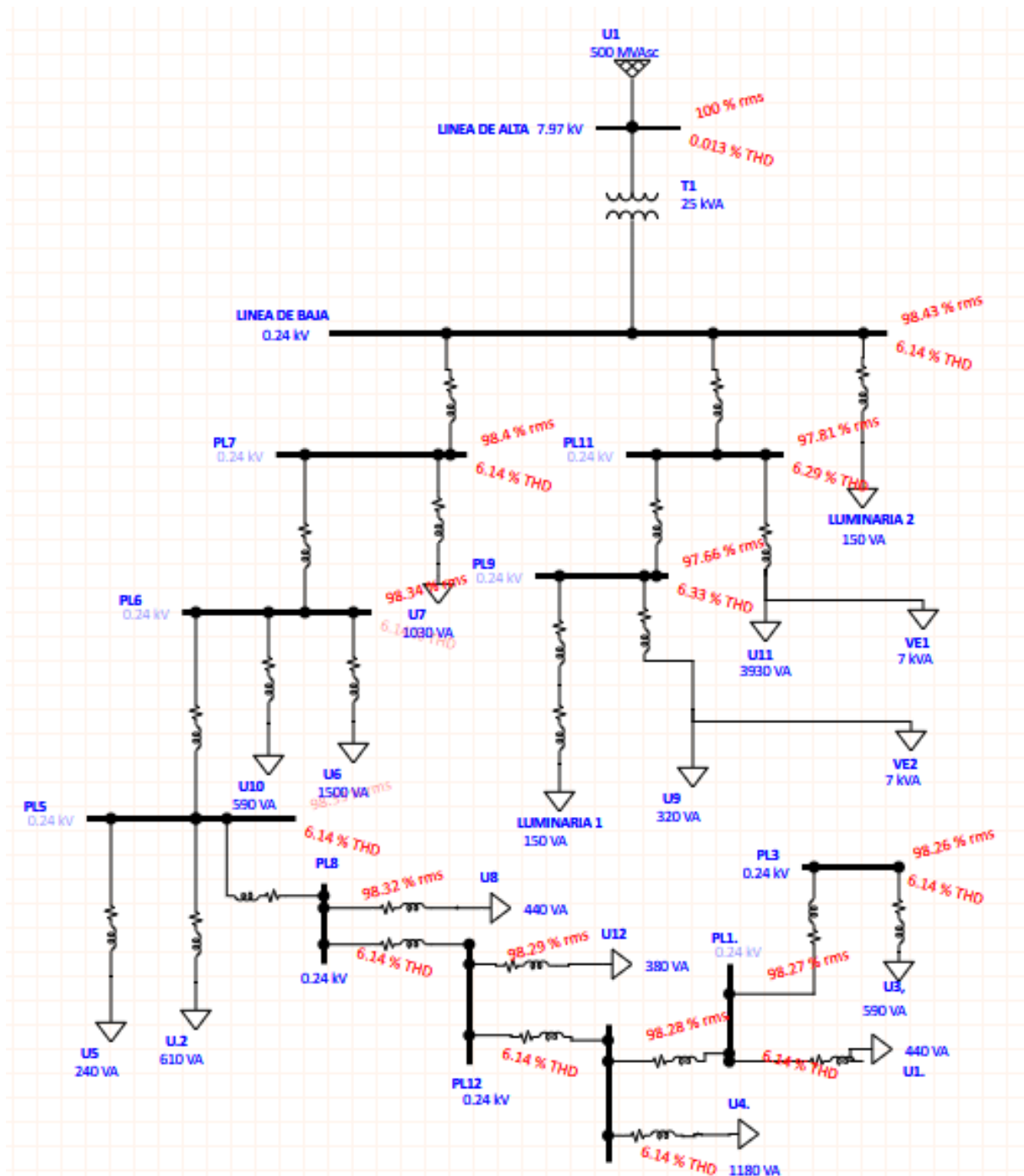
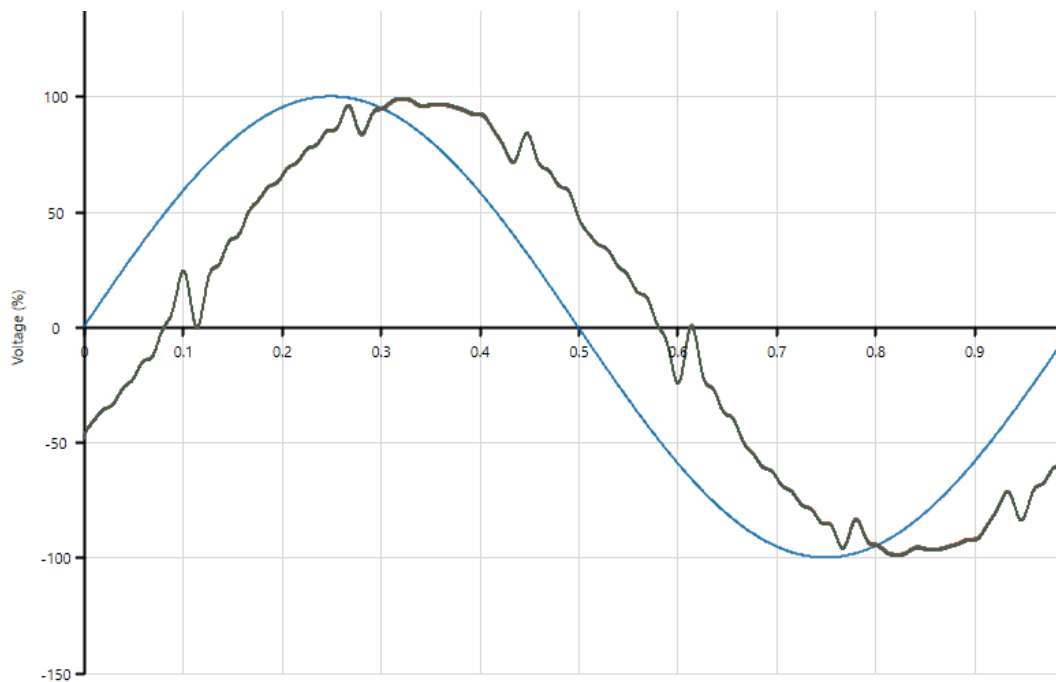


Figura 26: Simulación de red de distribución flujo de cargas armónicas con VE.

Vemos en la figura 26 como las barras de baja tensión sufren un aumento del THD provocando un daño en la red eléctrica creando pulsos no deseados solo con la incorporación de dos VE.



*Figura 27: Ondas flujo de cargas de armónicos con VE*

En este caso se incorporan las cargas de los VE y estos resultados evidencian:

- Incremento considerable de la demanda total del transformador.
- Aumento de las corrientes en las líneas de baja tensión.
- Presencia significativa de armónicos debido a la electrónica de potencia de los cargadores.
- Incremento del THD de voltaje, superando los valores recomendados en algunos nodos.

Aparición de armónicos de orden bajo y medio, visibles en el análisis espectral. Los cargadores de VE actúan como cargas no lineales, distorsionando la forma de onda de corriente y, por ende, la tensión del sistema, lo que afecta la calidad de la energía suministrada a todos los usuarios conectados al transformador como muestra la figura 27.

### 3.5.3. Casos de simulación con filtros armónicos

Para el siguiente caso se agregarán filtros armónicos en paralelo a la carga de VE como se muestra en la figura 28.

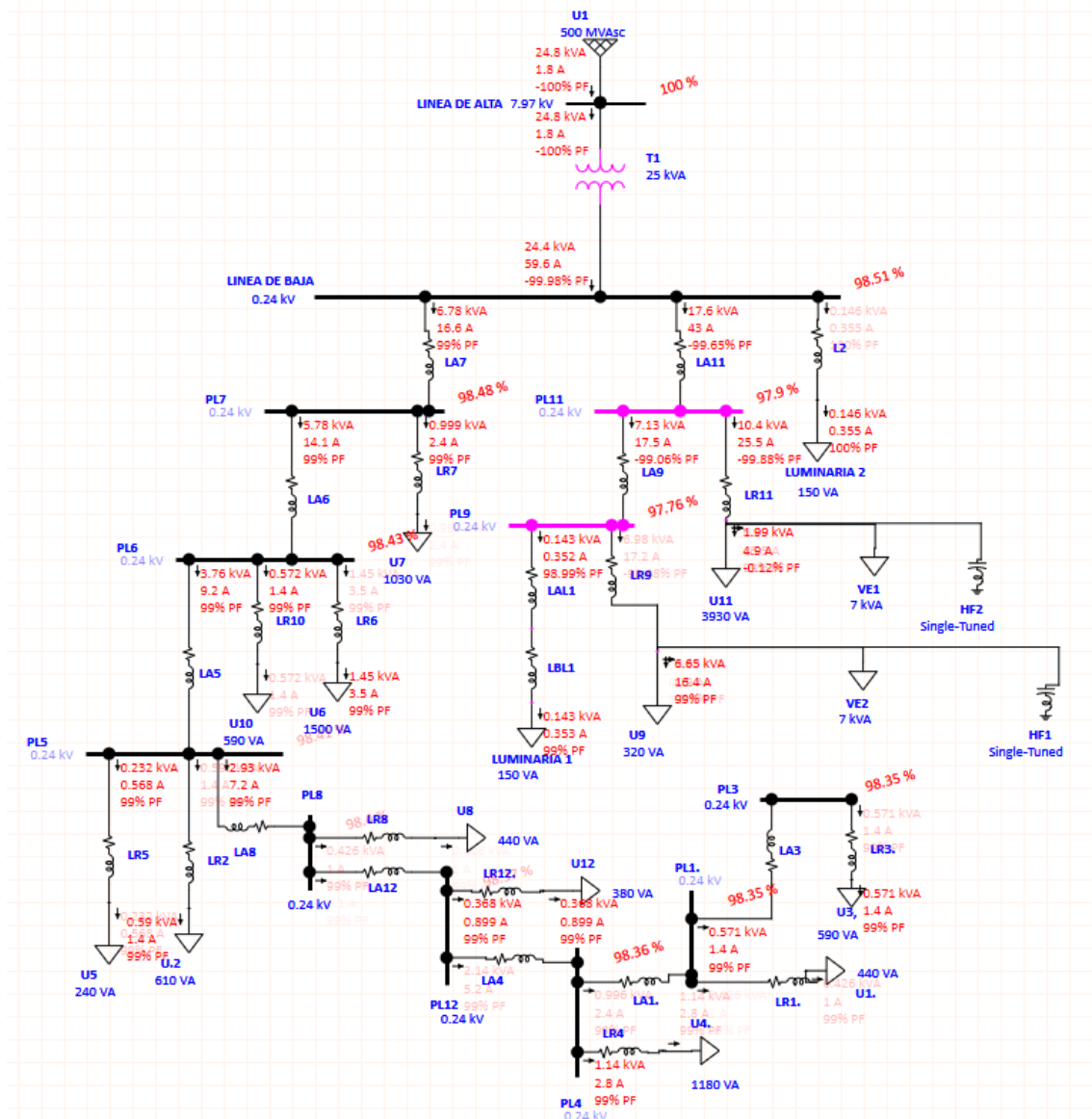


Figura 28: Simulación de red de distribución flujo de cargas armónicas con VE y filtros armónicos

Se puede ver como en la figura 29 que las barras de baja tensión mejoraron sus porcentajes de THD sin embargo aun presentan un porcentaje no seguro.

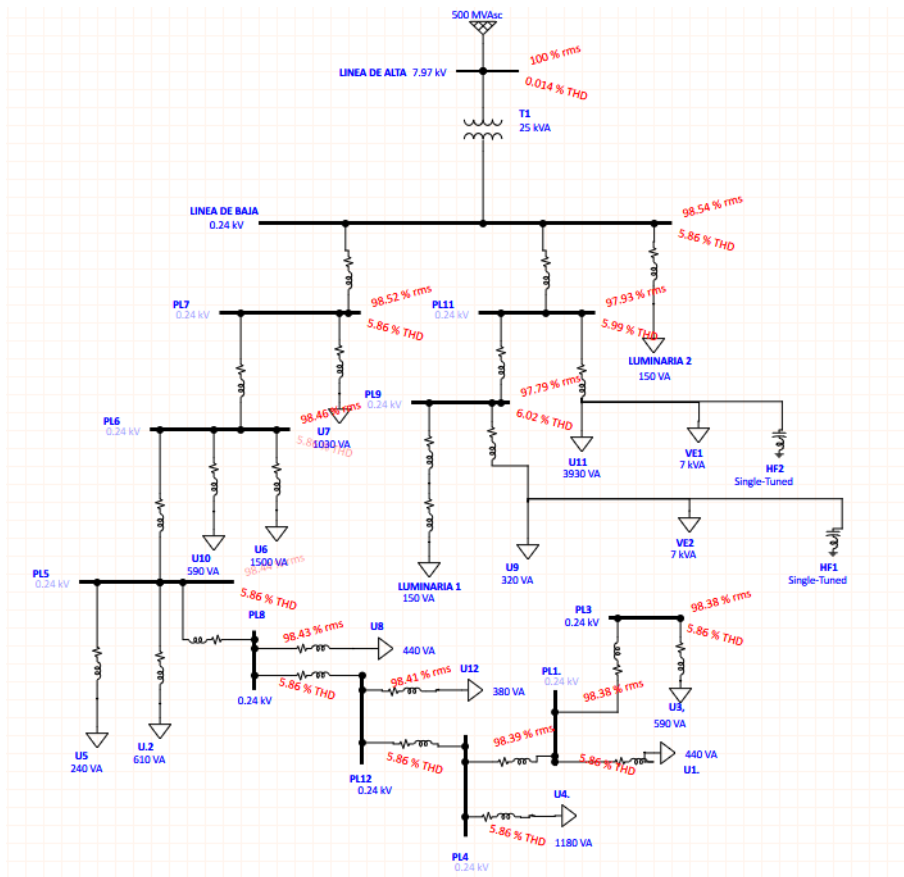


Figura 29: Análisis de ondas THD de red de distribución con filtros armónicos

Aquí se incorporan filtros armónicos diseñados para mitigar los efectos negativos producidos por las cargas no lineales como se muestran en la figura 29 y figura 30.

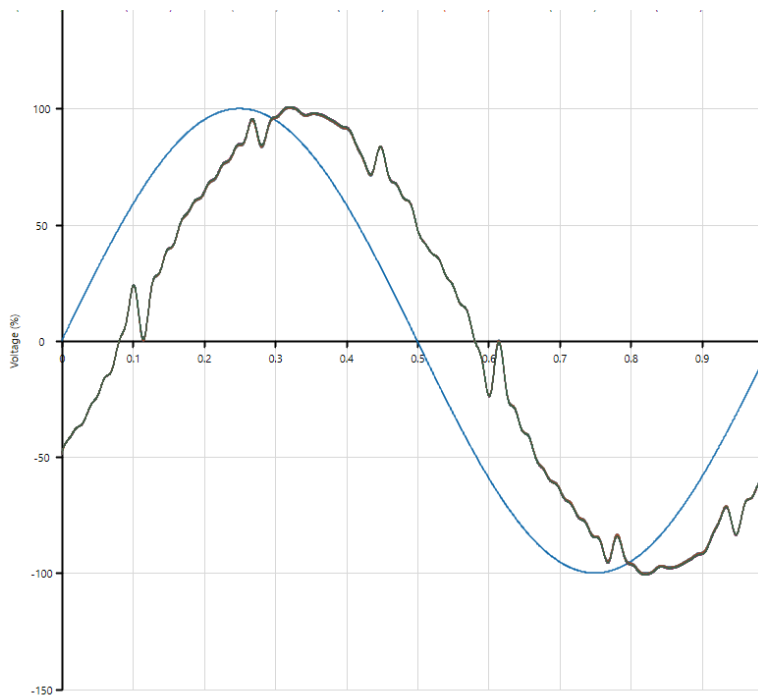


Figura 30: Análisis de ondas THD de red de distribución con filtros armónicos



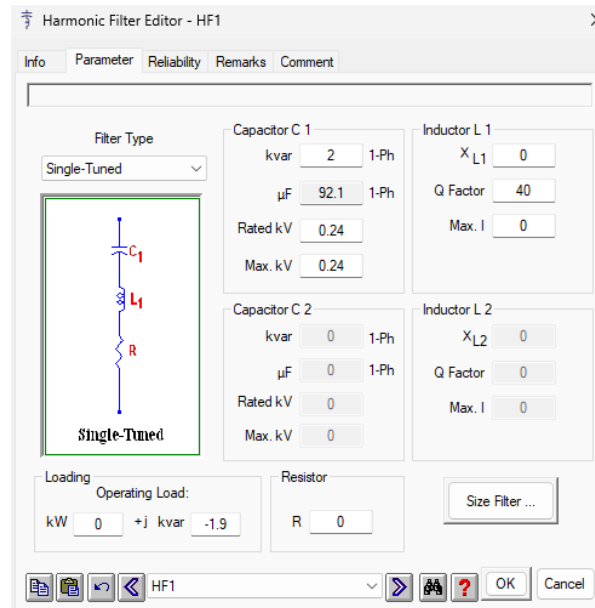


Figura 32: Configuración de parámetros en filtro de armónicos

En la figura 31 se ve la configuración que tiene este nuevo filtro armónico para cumplir con la normativa IEEE 519 como se muestra en la figura 32 y figura 33.

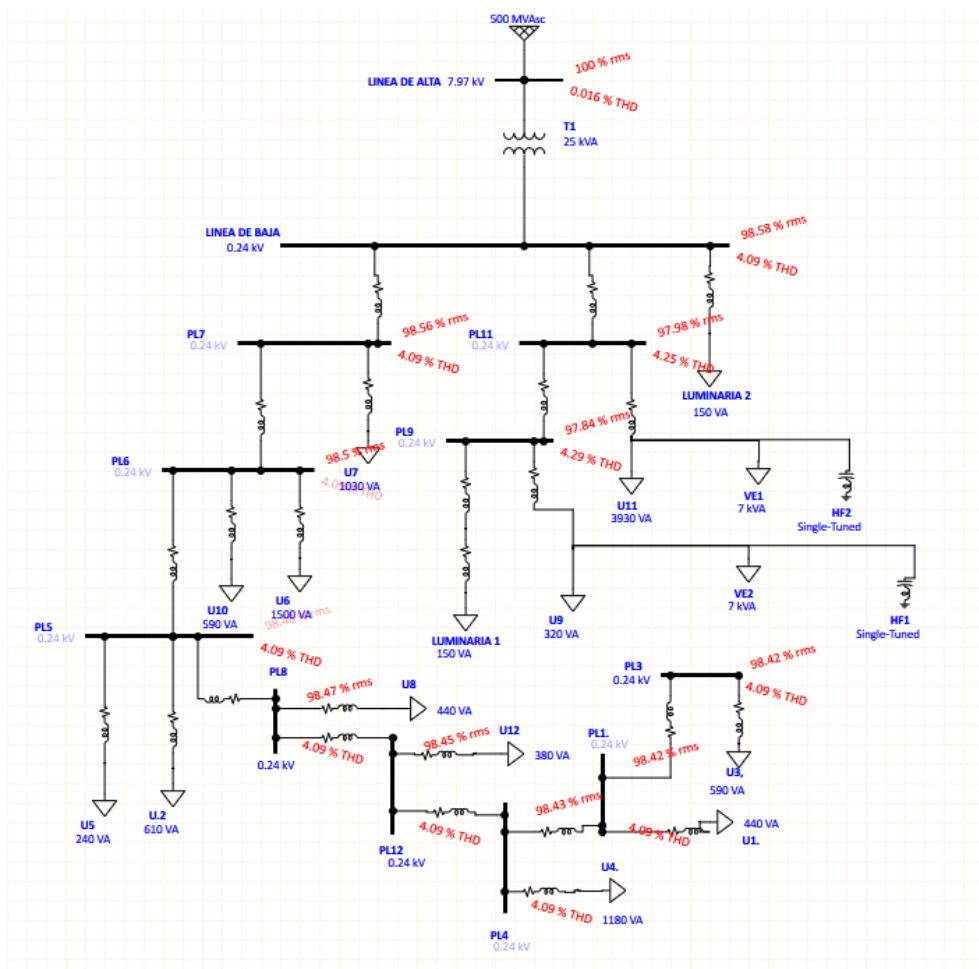


Figura 33: Flujo de cargas armónicas con filtro armónico cumpliendo IEEE 519

En la figura 34 se muestra la comparación entre la señal de voltaje sinusoidal ideal y una señal real de distorsión armónica en la señal de salida.

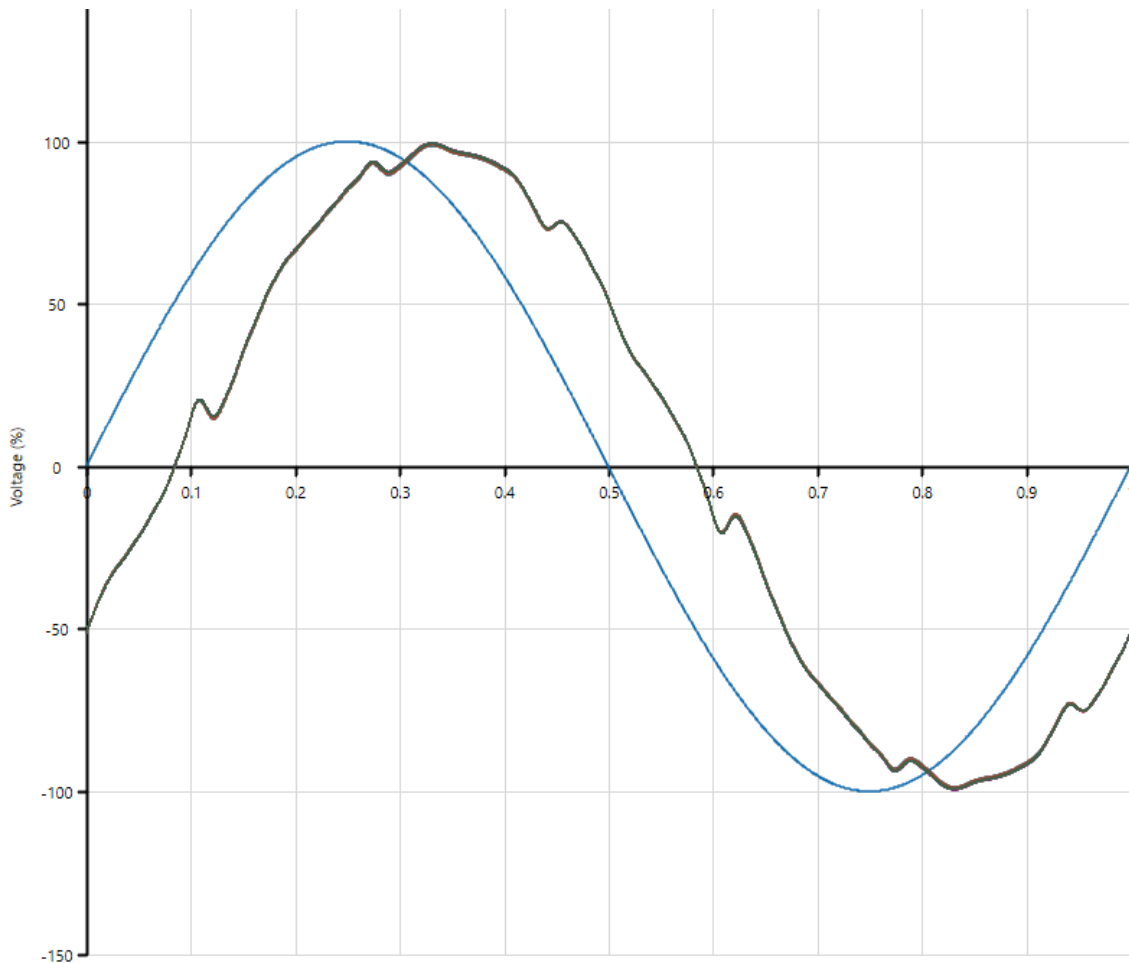


Figura 34: Configuración de filtro armónico para cumplir con IEEE 519

Este último caso verifica que los valores de distorsión armónica cumplen estrictamente con la normativa IEEE 519:

- THD de voltaje menor al **5 %** en buses de 240 V.
- Cumplimiento normativo garantizado.

Confirma que la solución propuesta no solo es técnicamente funcional, sino que también cumple con estándares internacionales, fortaleciendo la validez del estudio para su aplicación real como se muestra en la figura 34,[18][19].

Caso de simulación	Presencia de armónicos	THD de voltaje (THDv)	Armónicos dominantes	Factor de Potencia (PF)	Condición de la red
<b>Caso 1: Red SIN VE</b>	Baja	Muy bajo (<< 5 %)	Armónicos residuales de bajo orden	Alto ( $\approx 0.95 - 1.0$ )	Operación estable y dentro de norma
<b>Caso 2: Red CON VE</b>	Alta	Elevado (puede superar 5 %)	Armónicos de bajo y medio orden (3°, 5°, 7°)	Reducido ( $\approx 0.85 - 0.9$ )	Riesgo de deterioro de calidad de energía
<b>Caso 3: Red CON filtros armónicos</b>	Media	Reducido (< Caso 2)	Armónicos atenuados	Mejorado ( $\approx 0.92 - 0.96$ )	Operación mejorada y más estable
<b>Caso 4: Red CON filtros cumpliendo IEEE 519</b>	Baja	$\leq 5\%$ (cumple IEEE 519)	Armónicos individuales $\leq 3\%$	Alto ( $\approx 0.95 - 1.0$ )	Operación óptima y normativa

Tabla 3: Tabla comparativa de casos

#### Caso 1:

La red presenta un comportamiento casi ideal, con mínima distorsión armónica y un factor de potencia elevado, propio de cargas residenciales predominantemente lineales.

#### Caso 2:

La incorporación de cargadores de vehículos eléctricos introduce **cargas no lineales**, aumentando significativamente los armónicos y provocando una reducción del factor de potencia, lo que afecta la eficiencia del sistema y la calidad del suministro.

#### Caso 3:

La instalación de filtros permite mitigar parte de los armónicos generados, reduciendo el THD y mejorando el factor de potencia, aunque todavía puede no cumplirse completamente la normativa.

#### Caso 4:

Se alcanza una condición óptima de operación, donde el THD de voltaje y los armónicos individuales se mantienen dentro de los límites normativos, garantizando un factor de potencia elevado y una red eléctricamente saludable.

## 4. CAPÍTULO VI

### 4.1. Conclusiones

El desarrollo del estudio se basó en el análisis del comportamiento de una red de distribución residencial, con la presencia de cargadores para vehículos eléctricos, en el cual se pudo observar que estas cargas alteran en gran medida las condiciones de operación del sistema. La demanda aumentó, y también cambiaron los perfiles de carga y algunos parámetros eléctricos clave, revelando que la difusión de vehículos eléctricos implica mayores exigencias técnicas para la infraestructura de distribución.

Por otro lado, la comparación de los resultados obtenidos mediante herramientas gráficas y con valores numéricos también permitió localizar los puntos más críticos de la red, así como evaluar la influencia de los cargadores sobre dicha criticidad. En base a estas conclusiones se propusieron alternativas técnicas factibles que, sin duda, sustentan el argumento de que, con una apropiada planificación, gestión de la demanda y aplicación de estrategias de mitigación la integración de la movilidad eléctrica es factible sin poner en riesgo la calidad, confiabilidad y eficiencia del suministro eléctrico, aportando de manera consistente en la consecución de los objetivos de sustentabilidad y modernización del sistema energético.

### 4.2. Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas, se puede decir claramente que el sistema de distribución residencial analizado en el sector de Los Ceibos ya se encuentra exigido incluso antes de considerar una penetración masiva de vehículos eléctricos. La incorporación de cargadores VE genera incrementos notorios en la distorsión armónica total (THD) y caídas de tensión que ponen en evidencia las limitaciones reales de la infraestructura existente.

En este sentido, se recomienda evaluar otro sitio de estudio que cuente con un transformador de mayor capacidad o con una menor cantidad de cargas conectadas. El transformador monofásico de 25 kVA utilizado en el análisis trabaja muy cerca de su límite, por lo que cualquier incremento adicional de carga, como lo es la carga no lineal de los vehículos eléctricos, provoca un deterioro visible de la calidad de energía, alejándose de los valores recomendados por la normativa IEEE 519.

Los resultados permiten concluir que, en las condiciones actuales, el sector Los Ceibos no se encuentra preparado para una incorporación masiva de vehículos eléctricos, al menos sin realizar previamente mejoras en la red. Esto abre la puerta a la necesidad de repotenciar transformadores, redistribuir cargas o implementar soluciones de mitigación de armónicos, medidas que actualmente no forman parte del esquema típico de redes residenciales.

Adicionalmente, se recomienda que el análisis de distorsión armónica se complemente utilizando otro software especializado, especialmente para el estudio de casos monofásicos. Aunque ETAP ofrece una visión general del comportamiento del sistema, la modelación de cargas no lineales como los cargadores de vehículos eléctricos puede analizarse con mayor

detalle en herramientas que permitan observar el impacto armónico por fase y por orden, lo cual enriquecería significativamente los resultados del estudio.

Finalmente, se sugiere que futuros trabajos consideren escenarios más realistas de crecimiento de la demanda, evaluando redes con transformadores de mayor capacidad o con una planificación orientada a la movilidad eléctrica. De esta manera, se podrían proponer criterios técnicos que sirvan como referencia para la adaptación progresiva de las redes de distribución residenciales ante la llegada de los vehículos eléctricos.

## REFERENCIAS

- [1] J. T. Martínez Macías and W. X. Quezada López, “Análisis del Impacto en las Redes de Distribución por la Implementación de Cargadores de Vehículos Eléctricos en la ciudad de Guayaquil.,” 2024.
- [2] J. G. Vélez Sánchez, “Análisis y Estimación de la Demanda Eléctrica con la Implementación de Vehículos Eléctricos conectados a una Red de Distribución en Cuenca y El Ecuador,” Mar. 2017.
- [3] Banco Interamericano (BID), “Estrategia Nacional de Electromovilidad para Ecuador,” Apr. 2021.
- [4] M. Međugorac, T. Capuder, D. Bago, S. Sušac, and M. Marijanović, “IMPACT OF CHARGING STATIONS FOR ELECTRIC VEHICLES ON THE POWER DISTRIBUTION NETWORK,” Dec. 2022.
- [5] S. Deb, K. Tammi, K. Kalita, and P. Mahanta, “Impact of Electric Vehicle Charging Station Load on Distribution Network,” Jan. 2018.
- [6] L. Sánchez and L. Iván, “Modelo para la proyección de vehículos eléctricos particulares en el Ecuador y sus requerimientos de demanda, utilizando patrones de crecimiento logístico y simulación de Montecarlo.,” Jun. 2022.
- [7] S. Ramírez Castaño, “Redes de Distribución de Energía.,” 2009.
- [8] Ecuador TV Noticias, “Movilidad eléctrica y transición energética en el país.,” 2021.
- [9] V. V. Mehtre and I. Katakwar, “Power System Analysis Using ETAP,” vol. 12, no. 4, Apr. 2024.
- [10] L. A. Rodriguez Litz, “ESTUDIO Y APLICACIÓN DE LA NORMA IEEE 519 - 1992 EN LA MEDICIÓN, ANÁLISIS Y ELIMINACIÓN DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS INDUSTRIALES.,” 2021.
- [11] A. D. Sandoya Unamuno, L. Chica Martínez, G. R. Ordoñez, and J. L. Arias Zambrano, “Instalaciones Eléctricas,” Feb. 2018.
- [12] F. Ahmed *et al.*, “A holistic review of electric vehicle charging impacts on power distribution networks: Technical challenges, smart mitigation strategies and future directions,” *Appl. Energy*, vol. 402, p. 126961, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.apenergy.2025.126961.
- [13] S. Rahman, I. A. Khan, A. A. Khan, A. Mallik, and M. F. Nadeem, “Comprehensive review & impact analysis of integrating projected electric vehicle charging load to the existing low voltage distribution system,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 153, p. 111756, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2021.111756.

- [14] T. Guia, B. M'Hamdi, and A. Khechekhouche, "Electric vehicle charging stations load impact on the distribution network," *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, vol. 10, no. 9, p. 20813, Dec. 2024, doi: 10.18540/jcecvl10iss9pp20813.
- [15] D. G. Aguilar *et al.*, "Investigating the Impact of Electric Vehicle Charging Loads on CSUN's Electric Grid," Sep. 2024.
- [16] X. Zhu, P. Mishra, B. Mather, M. Zhang, and A. Meintz, "Grid Impact Analysis and Mitigation of En-Route Charging Stations for Heavy-Duty Electric Vehicles," Aug. 2022.
- [17] A. F. Soofi, R. Bayani, and S. D. Manshadi, "Analyzing Power Quality Implications of High Level Charging Rates of Electric Vehicle Within Distribution Networks," Jun. 2021.
- [18] Z. Yu, C. Yang, and Q. Wang, "The impact of large-scale EV charging on the real-time operation of distribution systems: A comprehensive review," Oct. 2025.
- [19] R. R. Shrestha *et al.*, "Smart Charging Impact Analysis using Clustering Methods and Real-world Distribution Feeders," Aug. 2025.
- [20] E. Raffoul and X. Li, "Assessing the Impact of Electric Vehicle Charging on Residential Distribution Grids," Nov. 2024.
- [21] Y. Xiong, B. Khaki, C. Chu, and R. Gadh, "Real-Time Bi-directional Electric Vehicle Charging Control with Distribution Grid Implementation," Nov. 2017.
- [22] G. A. Abiassaf and A. A. Arkadan, "Impact of EV Charging, Charging Speed, and Strategy on the Distribution Grid: A Case Study," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, vol. 5, no. 2, pp. 531–542, Apr. 2024, doi: 10.1109/JESTIE.2024.3352505.
- [23] W. Lin, H. Wei, L. Yang, and X. Zhao, "Technical review of electric vehicle charging distribution models with considering driver behaviors impacts," *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 11, no. 4, pp. 643–666, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.jtte.2024.06.001.
- [24] Y. T. Sun, H. D. Zhang, Z. H. Li, J. X. Li, C. Qi, and Z. Z. Liu, "The Impact of Electric Vehicle Charging Stations on Power Flow Calculation and Grid Loss," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 325–326, pp. 628–631, Jun. 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.325-326.628.
- [25] J. Sarda *et al.*, "A review of the electric vehicle charging technology, impact on grid integration, policy consequences, challenges and future trends," *Energy Reports*, vol. 12, pp. 5671–5692, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.egy.2024.11.047.
- [26] M. Owais Khan, S. Kirmani, and M. Rihan, "Impact assessment of electric vehicle charging on distribution networks," *Renewable Energy Focus*, vol. 50, p. 100599, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.ref.2024.100599.

- [27] P. Mehta, V. Tiefenbeck, and T. Staake, “Electric Vehicle Charging Strategies in Residential Communities: Permissible Penetration Levels and Emissions,” 2024. doi: 10.2139/ssrn.4877001.
- [28] W. M. H. W. Bunyamin, S. M. Muhamad, W. S. Saidon, and R. Baharom, “Investigating power quality issues in electric buggy battery charger systems: analysis and mitigation strategies,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 15, no. 3, p. 2534, Jun. 2025, doi: 10.11591/ijece.v15i3.pp2534-2544.
- [29] H. D. Vyas, “Review of the Impact of Electric Vehicle Charging on Distribution Networks,” *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 11, no. 6, pp. 102–106, Jun. 2023, doi: 10.22214/ijraset.2023.53581.
- [30] A. Tayri and X. Ma, “Grid Impacts of Electric Vehicle Charging: A Review of Challenges and Mitigation Strategies,” *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 14, p. 3807, Jul. 2025, doi: 10.3390/en18143807.