



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

MODALIDAD: INFORME DE INVESTIGACIÓN

Título:

Análisis Del Impacto de la Carga de Vehículos Eléctricos (VE) en los Transformadores de la Línea de Distribución del Sector San Silvestre -Bellavista de la Empresa Elepco S.A.

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magister en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia

Autor:

Ing. Shigui Shulca Cristian Estalin

Tutor:

Ing. Porras Reyes Jefferson Alverto

LATACUNGA –ECUADOR

2025

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “**Análisis Del Impacto de la Carga de Vehículos Eléctricos (VE) en los Transformadores de la Línea de Distribución del Sector San Silvestre -Bellavista de la Empresa Elepco S.A.**” presentado por el Ing. Shigui Shulca Cristian Estalin para optar por el título magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, abril de 2025



.....
MSc. Porras Reyes Jefferson Alverto
CC.070440044-9

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: “Análisis del impacto de la carga de vehículos eléctricos (VE) en los transformadores de la línea de distribución del sector San Silvestre - Bellavista de la empresa Elepco S.A.”, ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de magíster en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

Latacunga, abril 2025



.....
MSc. Ing. Toaza Iza Jimmy Xavier
CC: 171762106-2
Presidente del tribunal



.....
MSc. Ing. Vaca Gonzalez Jimmy Roberto
CC: 055002153-9
Lector 2



.....
MSc. Ing. Cayo Pallasco Iván Paul
CC: 055036004-4
Lector 3

DEDICATORIA

Dedico esta tesis con todo mi corazón a las personas que han sido mi fuerza y mi inspiración en este camino, a mi mamá, por su amor incondicional, su entrega incansable y por ser el pilar fundamental en mi vida. Gracias por enseñarme con tu ejemplo que todo esfuerzo tiene su recompensa, a mis abuelitos, por su cariño, sus consejos llenos de sabiduría y por ser esa base firme que siempre me sostiene, a mi hermano Edison y a mi hermana Mishel, por estar a mi lado, por su apoyo constante y por motivarme a seguir adelante cuando más lo necesitaba, a mi tía Lourdes, por su compañía, su fe en mí y por cada palabra de aliento que me impulsó a no rendirme, a Melany, por su cercanía, su ánimo constante y por estar presente en cada paso, celebrando mis logros como si fueran suyos. Este logro no es solo mío. Es de ustedes, por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Gracias por ser parte de este sueño.

ING. CRISTIAN ESTALIN SHIGUI

AGRADECIMIENTO

Agradezco, en primer lugar, a Dios, por brindarme la sabiduría, la fuerza y la perseverancia necesarias para culminar este trabajo, a mi madre, por su amor incondicional, su apoyo constante y por ser mi mayor ejemplo de dedicación y esfuerzo, a mi hermano, por su compañía, su paciencia y por motivarme a seguir adelante en los momentos difíciles. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

ING. CRISTIAN ESTALIN SHIGUI

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

Latacunga, abril 2025


.....
Ing. Shigui Shulca Cristian Estalin
CC: 0504231143

RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, abril 2025


.....
Ing. Shigui Shulca Cristian Estalin
CC: 0504231143

AVAL DEL PRESIDENTE

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: Análisis del impacto de la carga de vehículos eléctricos (VE) en los transformadores de la línea de distribución del sector San Silvestre -Bellavista de la empresa Elepco S.A., contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, abril 2025



.....

MSc. Ing. Toaza Iza Jimmy Xavier

CC:171762106-2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Título: Análisis del impacto de la carga de vehículos eléctricos (VE) en los transformadores de la línea de distribución del sector San Silvestre -Bellavista de la empresa Elepco S.A.

Autor: Shigui Shulca Cristian Estalin, Ing.

Tutor: Porras Reyes Jefferson Alberto, M.Sc.

RESUMEN

Este estudio examinó el impacto que la creciente adopción de vehículos eléctricos (VE) podría tener sobre los transformadores en una red de distribución específica, mediante la simulación de incrementos en la carga de 25%, 50% y 100%. Se centró en tres transformadores dentro del sistema, evaluando cómo estos incrementos afectan tanto la capacidad de carga como los perfiles de voltaje. Los resultados revelan una capacidad variable entre los transformadores para manejar los aumentos en la demanda, destacando especialmente la robustez del Transformador TA frente a los desafíos presentados por los Transformadores TB y TC. La investigación resalta la necesidad crítica de modernizar la infraestructura eléctrica y adoptar estrategias de gestión de la demanda para abordar el aumento esperado de la carga eléctrica debido a los VE. Concluye destacando la importancia de la planificación estratégica y la cooperación entre todos los actores involucrados para garantizar una transición energética equilibrada hacia una mayor adopción de vehículos eléctricos, enfatizando la necesidad de preparar la red eléctrica para satisfacer la demanda futura de manera sostenible y eficiente. Este estudio ofrece valiosas ideas para reguladores, empresas energéticas y responsables de políticas públicas, evidenciando la importancia de anticipar las necesidades de infraestructura eléctrica y gestionar adecuadamente la carga para mantener un suministro eléctrico confiable en la era de la movilidad eléctrica.

PALABRAS CLAVE: Vehículos eléctricos, Carga de transformadores, Gestión de demanda eléctrica, Infraestructura de distribución, Planificación energética.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Title: Impact Analysis of Electric Vehicle Load on Distribution Line Transformers in the San Silvestre-Bellavista Sector - Elepco

Author: Shigui Shulca Cristian Estalin, Eng.

Advisor: Porras Reyes Jefferson Alberto, M.Sc.

Abstract:

This study examined the impact that the increasing adoption of electric vehicles (EVs) could have on transformers in a specific distribution network, through simulations of load increases of 25%, 50%, and 100%. It focused on three transformers within the system, evaluating how these increases affect both load capacity and voltage profiles. The results reveal varying capacities among the transformers to handle rising demand, particularly highlighting the robustness of Transformer TA compared to the challenges faced by Transformers TB and TC. The research underscores the critical need to modernize the electrical infrastructure and adopt demand management strategies to address the anticipated increase in electrical load due to EVs. It concludes by emphasizing the importance of strategic planning and collaboration among all stakeholders to ensure a balanced energy transition towards greater EV adoption, stressing the need to prepare the power grid to meet future demand sustainably and efficiently. This study offers valuable insights for regulators, energy companies, and policymakers, demonstrating the importance of anticipating electrical infrastructure needs and effectively managing load to maintain a reliable power supply in the era of electric mobility.

Keywords: Electric vehicles, Transformer load, Electric demand management, Distribution infrastructure, Energy planning.

AVAL DE TRADUCCIÓN

Nelson Wilfrido Guagchinga Chicaiza con cédula de identidad número: 0503246415, magister en la Enseñanza del idioma inglés como lengua extranjera, con número de registro de la SENESCYT: 1010-2019-2041252; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: Aplicación Del Proceso De Análisis Jerárquico (AHP) Para Mejorar La Gestión De Inventario En Una Empresa Distribuidora De Equipos De Impresión De Gran Formato, aspirante a magister en Administración de Empresas.

Latacunga, abril, 2025



Nelson Wilfrido Guagchinga Chicaiza
CC.0503246415

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INFORMACIÓN GENERAL.....	1
2. INTRODUCCIÓN.....	1
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	3
3.1. Modelos existentes de carga de vehículos eléctricos (VE) en transformadores de líneas de distribución.....	3
3.2. Modelos de simulación estocástica.....	3
3.3. Modelos de flujo de potencia AC/DC.....	4
3.4. Modelos de carga basados en perfiles de consumo.....	4
3.5. Modelos de optimización.....	4
3.6. Modelos de agregación de VE.....	5
3.7. Modelos basados en redes neuronales y aprendizaje automático.....	5
3.8. Modelos de simulación en tiempo real.....	5
3.9. Modelos de simulación de eventos discretos.....	5
3.10. Beneficios de la carga de vehículos eléctricos (VE) en transformadores de líneas de distribución.....	6
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	13
4.1. Estudio caso base.....	13
4.2. Estudio con el incremento del 25% en la carga.....	15
4.3. Estudio con el incremento del 50% en la carga.....	16
4.4. Estudio con el incremento del 100% en la carga.....	18
5. CONCLUSIONES.....	19
6. REFERENCIAS.....	20

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2. Diagrama de flujo de la metodología	9
FIGURA 3. Diagrama del sistema	11
FIGURA 4. Incremento del 25% en la carga	16
FIGURA 5. Incremento del 50% en la carga	17
FIGURA 6. Incremento del 100% en la carga	19

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cargas del sistema.....	10
Tabla 2. Transformadores del sistema.....	10
Tabla 3. Tramos del sistema.....	10
Tabla 4. Transformadores del sistema caso base	14
Tabla 5. Transformadores del sistema caso 25%	16
Tabla 6. Transformadores del sistema caso 50%	17
Tabla 7. Transformadores del sistema caso 100%	19

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del Proyecto:	Análisis del impacto de la carga de vehículos eléctricos (VE) en los transformadores de la línea de distribución del sector San Silvestre - Bellavista de la empresa Elepco S.A.
Línea de investigación:	Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.
Proyecto de investigación asociado:	Desarrollo de sistemas eficientes para el abastecimiento y uso de energía eléctrica a nivel local, regional o nacional.
Grupo de Investigación:	Sistemas Eléctricos de Potencia
Red nacional o internacional:	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE)

2. INTRODUCCIÓN

La creciente integración de vehículos eléctricos (VE) en la red eléctrica global marca un hito importante en el camino hacia sistemas de transporte más sostenibles y ecológicos [1]. Este proceso se ve fuertemente impulsado por una combinación de políticas gubernamentales proactivas y una notable evolución en la conciencia ambiental de la sociedad [2]. [3]Estas iniciativas están enfocadas no solo en la mitigación del cambio climático mediante la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, sino también en promover un cambio significativo en la percepción pública hacia prácticas de consumo más responsables con el medio ambiente [4]. A medida que la demanda de vehículos eléctricos aumenta, se evidencia una presión creciente sobre las infraestructuras eléctricas existentes, especialmente en lo que respecta a los transformadores de la línea de distribución, cuya capacidad y diseño original podrían no ser suficientes para soportar el incremento en la carga eléctrica derivada de la carga masiva de VE [5].

[6] Se amplía este debate destacando cómo las políticas de incentivos para la compra de VE y las inversiones en infraestructura de carga están acelerando la adopción de estos vehículos. No obstante, subraya la importancia crítica de evaluar y adaptar la infraestructura eléctrica subyacente para evitar cuellos de botella y garantizar una transición fluida. Esta necesidad de adaptación presenta retos significativos para los operadores de redes eléctricas, quienes deben equilibrar la demanda adicional con la estabilidad y fiabilidad del suministro eléctrico [7].

El Barman et al. (2023) se señala que los transformadores de distribución, diseñados para cargas eléctricas convencionales, enfrentan el riesgo de sobre operación y envejecimiento acelerado debido a la carga continua y a menudo simultánea de múltiples VE durante las horas pico. Esto podría resultar no solo en una disminución de la eficiencia operativa y de la vida útil de estos equipos críticos sino también en un aumento en la frecuencia de interrupciones del servicio eléctrico, afectando así la calidad del servicio proporcionado a los consumidores [9].

Frente a estos desafíos, en [10] se propone una serie de soluciones técnicas y operativas, incluyendo la modernización de los transformadores existentes, la instalación de nuevos equipos con mayor capacidad de carga, y la implementación de sistemas de gestión de carga inteligente. Estas estrategias, argumenta, no solo ayudarían a mitigar el impacto de la carga de VE en la red eléctrica sino también a optimizar el rendimiento y la eficiencia de la red en su conjunto [11].

Por lo tanto, la adaptación de las infraestructuras eléctricas a la creciente demanda de energía de los vehículos eléctricos es un proceso complejo que requiere inversiones considerables, innovación tecnológica y una planificación estratégica sólida [12]. Este proceso no solo es crucial para la sostenibilidad ambiental a largo plazo, sino que también representa una oportunidad significativa para mejorar la resiliencia y eficiencia de la red eléctrica global, asegurando así que la transición hacia la movilidad eléctrica se realice de manera sostenible y eficiente [13].

Este escenario es particularmente relevante para el sector San Silvestre-Bellavista, donde la empresa Elepco se enfrenta al desafío de equilibrar la creciente demanda energética con la sostenibilidad y fiabilidad de su servicio. Dicha área, con sus características demográficas y económicas únicas, sirve como un caso de estudio

invaluable para comprender y anticipar los impactos de la electrificación del transporte en infraestructuras similares [14].

Para abordar estos desafíos, se requiere una comprensión detallada de las dinámicas específicas de carga de los VE en la red eléctrica, incluyendo la variabilidad en los patrones de carga y las potenciales soluciones para mitigar el impacto en los transformadores. Estrategias como la actualización de la infraestructura existente, la implementación de sistemas de gestión de carga inteligente y el desarrollo de nuevos modelos de transformadores diseñados específicamente para acomodar la carga de los VE están entre las opciones consideradas por los investigadores y profesionales del sector [15].

Asimismo, el estudio de estas dinámicas ofrece oportunidades para innovar en el diseño y la operación de la red eléctrica, promoviendo un suministro más resiliente y adaptativo que pueda satisfacer las demandas actuales sin comprometer la capacidad de futuras generaciones. En este contexto, el sector San Silvestre-Bellavista, bajo la administración de Elepco, no solo se convierte en un laboratorio para probar soluciones prácticas a los retos presentados por la electrificación del transporte sino también en un referente para otras regiones que enfrentan o enfrentarán situaciones similares.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Modelos existentes de carga de vehículos eléctricos (VE) en transformadores de líneas de distribución

El análisis de la carga de vehículos eléctricos (VE) sobre los transformadores de líneas de distribución es un área de estudio que ha generado varios modelos y enfoques para evaluar el impacto que la creciente adopción de los VE podría tener sobre la infraestructura eléctrica. Algunos de los modelos existentes se presentan a continuación:

3.2. Modelos de simulación estocástica

Descripción: Estos modelos utilizan métodos probabilísticos para simular los patrones de carga de VE, considerando la incertidumbre en el comportamiento del

usuario, como los tiempos de inicio de carga y la duración. El uso de simulaciones de Monte Carlo es común en este enfoque. Aplicación: Permiten analizar cómo la carga de VE afecta a los transformadores bajo diferentes escenarios de penetración de VE, horarios de carga y comportamiento de los usuarios.

3.3. Modelos de flujo de potencia AC/DC

Descripción: Estos modelos se basan en el análisis del flujo de potencia en redes eléctricas, considerando tanto corriente alterna (AC) como corriente continua (DC). Se utilizan para estudiar cómo la carga de VE afecta la distribución de voltajes, corrientes y pérdidas en la red.

Aplicación: Son útiles para evaluar el impacto en la estabilidad de la red y la eficiencia de los transformadores, permitiendo identificar posibles sobrecargas y caídas de voltaje.

3.4. Modelos de carga basados en perfiles de consumo

Descripción: Este enfoque utiliza perfiles de carga previamente definidos, basados en datos históricos o investigaciones de mercado, para modelar el comportamiento de los VE. Los perfiles pueden incluir información sobre el horario de carga, la demanda de energía y la frecuencia de carga.

Aplicación: Facilita el análisis de la capacidad de los transformadores para soportar la carga adicional de los VE y ayuda en la planificación de infraestructura.

3.5. Modelos de optimización

Descripción: Los modelos de optimización buscan minimizar las pérdidas o maximizar la eficiencia del sistema eléctrico bajo la nueva carga de VE. Estos modelos pueden incluir restricciones relacionadas con la capacidad del transformador, la topología de la red y las regulaciones de voltaje.

Aplicación: Se utilizan para encontrar la mejor estrategia de operación de la red, como ajustar las tarifas eléctricas para influir en los patrones de carga u optimizar el despacho de energía.

3.6. Modelos de agregación de VE

Descripción: En este enfoque, los vehículos eléctricos se modelan como una carga agregada que puede ser gestionada de forma colectiva, similar a una Microred. Se consideran estrategias de carga coordinada y control directo de la demanda.

Aplicación: Útil para analizar cómo la gestión colectiva de la carga de VE puede reducir el impacto sobre los transformadores y la red de distribución alineando la carga con la capacidad disponible.

3.7. Modelos basados en redes neuronales y aprendizaje automático

Descripción: Estos modelos emplean técnicas de inteligencia artificial para predecir los patrones de carga de VE y su impacto en los transformadores. Mediante el entrenamiento con datos históricos, las redes neuronales pueden aprender a identificar patrones complejos y predecir el comportamiento futuro.

Aplicación: Permiten un análisis más dinámico y adaptable, especialmente en escenarios donde los patrones de carga son altamente variables y difíciles de predecir.

3.8. Modelos de simulación en tiempo real

Descripción: Estos modelos permiten la simulación en tiempo real del impacto de la carga de VE en la red de distribución, utilizando datos en tiempo real de sensores y sistemas de monitoreo.

Aplicación: Son útiles para la operación en tiempo real de la red eléctrica, permitiendo la detección inmediata y la respuesta a problemas de sobrecarga en los transformadores.

3.9. Modelos de simulación de eventos discretos

Descripción: Se enfocan en simular eventos específicos, como la conexión o desconexión de un VE, y su impacto en los transformadores. Estos modelos son adecuados para evaluar cómo eventos específicos afectan el desempeño de la red.

Aplicación: Se utilizan para un análisis detallado de escenarios específicos, como el efecto de un aumento repentino de carga debido a una alta penetración de VE en un área limitada.

3.10. Beneficios de la carga de vehículos eléctricos (VE) en transformadores de líneas de distribución

Aunque la carga de vehículos eléctricos (VE) en transformadores de líneas de distribución presenta desafíos, también existen varios beneficios potenciales para el sistema eléctrico. Algunos de estos beneficios se detallan a continuación:

Mejor aprovechamiento de la capacidad de la red

Optimización de la carga: Si la carga de VE se gestiona correctamente, puede ayudar a suavizar la curva de demanda de electricidad. Esto significa que los transformadores y otros equipos de la red pueden operar más cerca de su capacidad óptima, reduciendo la necesidad de sobredimensionar la infraestructura.

Carga nocturna: Muchos usuarios de VE cargan sus vehículos durante la noche, cuando la demanda de electricidad es generalmente más baja. Esto puede ayudar a nivelar la carga en los transformadores, mejorando su eficiencia y reduciendo el estrés durante las horas pico.

Incentivo para la modernización de la infraestructura

Actualización de la red: El aumento de la demanda de VE puede servir como un catalizador para la modernización de la red de distribución, incluidos los upgrades de transformadores e incorporación de tecnologías de redes inteligentes. Esto no solo mejora la capacidad de manejar la carga de VE, sino que también fortalece la red contra otros tipos de demanda y eventos imprevistos.

Integración de energías renovables: La retroalimentación impulsada por la carga de VE puede facilitar la integración de fuentes de energía renovable, como la solar y eólica, al permitir una mayor flexibilidad y capacidad de almacenamiento en la red.

Oportunidades para la gestión de la demanda y respuesta a la demanda

Gestión activa de la carga: Los VE pueden ser utilizados en programas de gestión de la demanda, donde los operadores de la red pueden ajustar la tarifa y el horario de carga en respuesta a las condiciones de la red. Esto permite reducir los picos de demanda y mejorar la estabilidad del sistema.

Respuesta a la demanda: Se puede incentivar a los propietarios de VE para que carguen sus vehículos durante períodos de baja demanda o alta disponibilidad de energía renovable, lo que puede reducir la necesidad de generar electricidad a partir de fuentes más caras o contaminantes durante la demanda máxima.

Almacenamiento de energía distribuido

Vehículo a red (V2G): En escenarios avanzados, los VE pueden actuar como unidades de almacenamiento de energía distribuidas, alimentando electricidad de vuelta a la red durante períodos de alta demanda. Esto no solo ayuda a aliviar la carga en los transformadores, sino que también proporciona respaldo adicional de energía para la red.

Estabilización de la red: Los VE, cuando están conectados, pueden ayudar a estabilizar la frecuencia y el voltaje de la red, funcionando como un recurso regulador que apoya el equilibrio entre la oferta y la demanda en tiempo real.

Reducción de emisiones y mejoras en sostenibilidad

Eficiencia energética: La electrificación del transporte puede llevar a un uso más eficiente de la energía, especialmente cuando los VE se cargan durante períodos en los que la red utiliza una mayor proporción de fuentes renovables.

Impacto ambiental: A largo plazo, una red eléctrica más eficiente optimizada para la carga de VE puede contribuir a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, ayudando a las comunidades a alcanzar sus objetivos de sostenibilidad.

Este análisis permite a ELEPCO alinear sus operaciones con sus políticas estratégicas, garantizando un sistema eléctrico sostenible, eficiente y gestionado con total transparencia.

Desarrollo de nuevos modelos de negocio

Tarifas dinámicas

La carga de VE puede promover el desarrollo de tarifas eléctricas dinámicas, donde los precios varían según la demanda, incentivando la carga en momentos que beneficien tanto al usuario como a la red.

Servicios energéticos: Las empresas eléctricas pueden desarrollar nuevos servicios, como la instalación de infraestructura de carga y ofrecer contratos energéticos específicos para usuarios de VE, generando ingresos adicionales y mejorando la experiencia del cliente.

Eficiencia energética

La carga adicional generada por los VE puede causar sobrecargas en los transformadores, afectando la calidad del servicio. Al realizar este análisis, ELEPCO asegura un suministro eléctrico estable, cumpliendo su compromiso con la responsabilidad social mediante la mejora de la eficiencia energética y garantizando el bienestar de los clientes.

Innovación y sostenibilidad

El creciente uso de vehículos eléctricos (VE) se alinea con los objetivos de sostenibilidad de ELEPCO. Este análisis permite a la empresa comprender mejor cómo la carga adicional de los VE afecta a los transformadores de distribución, ayudándoles a planificar infraestructura capaz de manejar de manera sostenible el aumento de la demanda. Además, facilita la implementación de tecnologías de medición avanzadas para gestionar y monitorear mejor el consumo eléctrico.

En cualquier proyecto relacionado con la infraestructura de vehículos eléctricos, ELEPCO asegura que los procesos de adquisición y gestión sean transparentes y estén libres de corrupción, adhiriéndose a sus políticas de gobernanza. Esto garantiza la ejecución eficiente y justa de los proyectos relacionados con la modernización de la red eléctrica.

La Figura 1 representa un diagrama de flujo de un proceso de análisis de carga (Load Flow Analysis) utilizando el software DIgSILENT PowerFactory. Este tipo de análisis es esencial para estudiar el comportamiento operativo de un sistema eléctrico bajo condiciones de carga específicas. El flujo del proceso es el siguiente:

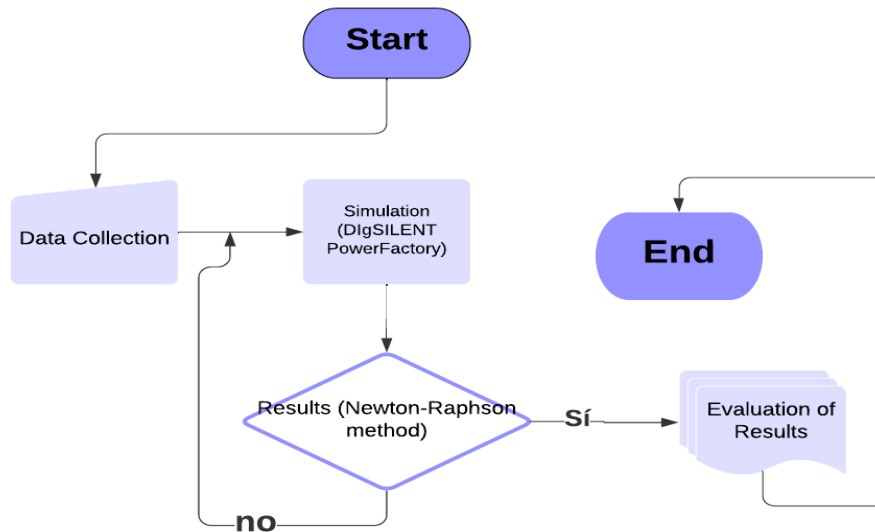


FIGURA 1. Diagrama de flujo de la metodología

Para evaluar el impacto de la integración de vehículos eléctricos en la red de distribución, esta metodología propone realizar simulaciones de incremento de demanda en tres transformadores seleccionados del sistema, utilizando el software DIgSILENT PowerFactory. La demanda se incrementará en tres escenarios distintos: 25%, 50% y 100%, para simular diversas intensidades de adopción de vehículos eléctricos. Inicialmente, se modelará la demanda energética actual de cada transformador para establecer una línea base. Posteriormente, se aplicarán los incrementos de demanda propuestos sobre esta base, utilizando herramientas avanzadas de simulación para generar y analizar los perfiles de voltaje en puntos críticos y evaluar la capacidad de los transformadores para soportar estas cargas adicionales sin comprometer su operación eficiente.

Los resultados de estas simulaciones permitirán identificar los impactos potenciales en la red y elaborar recomendaciones dirigidas a mitigar efectos adversos, tales

como la necesidad de modernización de infraestructuras o la instalación de nuevos equipos con mayor capacidad de carga. Este enfoque metodológico integral busca proporcionar un análisis detallado y práctico sobre cómo la carga de vehículos eléctricos podría afectar la infraestructura eléctrica existente y orientar sobre las medidas a adoptar para garantizar un suministro eléctrico sostenible y fiable frente al crecimiento de la movilidad eléctrica. El caso base del sistema consta de los siguientes datos: En la Tabla 1, se aprecia las cargas del sistema de distribución.

Tabla 1. Cargas del sistema

Nº	Nombre	Potencia activa [MW]	Potencia reactiva [Mvar]
1	Carga A	0,0139	0,0055
2	Carga B	0,3557	0,1185
3	Carga C	0,0235	0,0082

En la **Tabla 2**, se evidencia los transformadores del sistema

Tabla 2. Transformadores del sistema

Nº	Nombre	Cargabilidad [%]	Voltaje LV [V]	Voltaje HV [V]
1	TA	1,50	0,9984	0,9986
2	TB	38,09	0,9845	0,9882
3	TC	2,54	0,9843	0,9846

En la **Tabla 3**, se evidencia los tramos del Sistema

Tabla 3. Tramos del sistema

Nº	Nombre	Pérdidas [kW]	Longitud [km]
1	Línea 1-2	0,0003	0,017
2	Línea 1-3	1,83412	0,077
3	Línea 2-4	0,01275	0,233
4	Línea 3-6	0,0735	0,377
5	Línea 5-1	0,0000	0,174

En la figura 2, se aprecia el diagrama del sistema simulado en Digsilent Power Factory

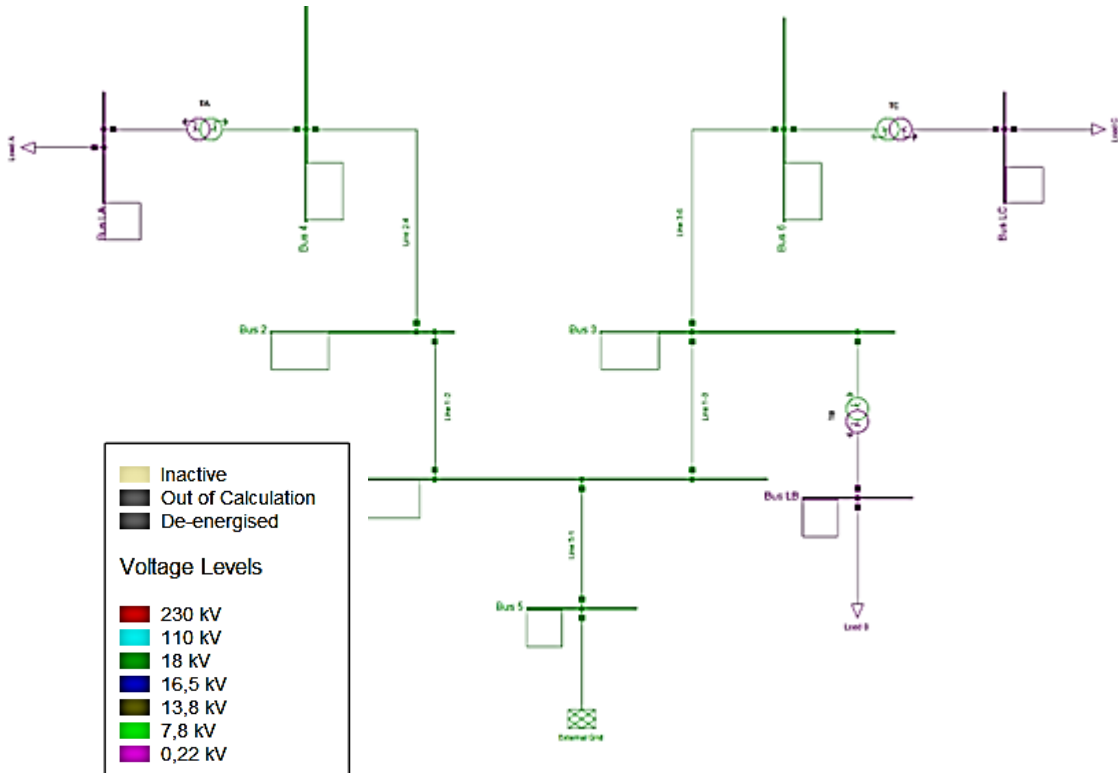


FIGURA 2. Diagrama del sistema

Para realizar un flujo de potencia utilizando el método de Newton-Raphson, se requiere la formulación de un sistema de ecuaciones no lineales que describen las relaciones entre las variables de estado (ángulos de fase y magnitudes de voltaje) y las potencias inyectadas en las barras del sistema. A continuación, se presentan las ecuaciones y el proceso asociado [16]:

El flujo de potencia se basa en las ecuaciones de potencia activa (P_i) y reactiva (Q_i) para cada barra i del sistema:

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \text{sen}(\theta_i - \theta_j)) \quad (1)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \text{sen}(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)) \quad (2)$$

Donde:

V_i y V_j son las magnitudes de voltaje en las barras i y j

θ_i y θ_j son los ángulos de fase en las barras i y j

G_{ij} y B_{ij} son las conductancias y susceptancias de la línea que conecta las barras i y j

n es el número total de barras en el sistema.

El objetivo del método de Newton-Raphson es encontrar los valores de θ_i y V_i que satisfacen las ecuaciones de potencia. Se define un conjunto de ecuaciones de error ΔP_i y ΔQ_i :

$$\Delta P_i = P_i^{espec} - P_i^{calc} = 0 \quad (3)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{espec} - Q_i^{calc} = 0 \quad (4)$$

Donde:

P_i^{espec} y Q_i^{espec} son las potencias activas y reactivas especificadas

P_i^{calc} y Q_i^{calc} son las potencias calculadas a partir de las ecuaciones mencionadas anteriormente

El método de Newton-Raphson utiliza una aproximación iterativa para resolver el sistema de ecuaciones no lineales. La iteración k se describe por:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta^{(k)} \\ \Delta V^{(k)} \end{bmatrix} = -J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Donde:

$\Delta\theta^{(k)}$ y $\Delta V^{(k)}$ son las correcciones de los ángulos de fase y magnitudes de voltaje en la iteración k

J es la matriz Jacobiana, que contiene las derivadas parciales de las ecuaciones de potencia con respecto a las variables de estado θ_i y V_i :

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial \Delta V} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial \Delta V} \end{bmatrix} \quad (6)$$

El proceso iterativo continúa hasta que las correcciones $\Delta\theta^{(k)}$ y $\Delta V^{(k)}$ sean suficientemente pequeñas, cumpliendo con un criterio de convergencia predefinido, tal como:

$$\max(|\Delta\theta^{(k)}|, |\Delta V^{(k)}|) < \epsilon \quad (7)$$

Donde:

ϵ es un umbral pequeño que define la precisión deseada

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Estudio caso base

La Tabla 4, muestra las condiciones operativas iniciales de tres transformadores, denominados TA, TB, y TC, dentro del sistema. Estos resultados establecen el punto de partida para evaluar el impacto de los incrementos de carga debido a la integración de vehículos eléctricos en la red de distribución.

El Transformador TA muestra una cargabilidad muy baja del 1,50%, indicando que está operando muy por debajo de su capacidad máxima. Los voltajes en el lado de baja tensión (LV) y alta tensión (HV) son de 0,9984 y 0,9986, respectivamente, lo cual sugiere que el transformador está manteniendo un nivel de voltaje casi ideal, cercano al valor nominal. Esta situación refleja una operación altamente eficiente y estable bajo las condiciones de carga actuales, con un margen significativo para manejar incrementos de carga sin comprometer el rendimiento eléctrico.

El Transformador TB, con una cargabilidad del 38,09%, está operando a una fracción más significativa de su capacidad total. A pesar de esto, los voltajes en el lado de baja y alta tensión, 0,9845 y 0,9882 respectivamente, permanecen dentro de rangos aceptables, aunque se observa una ligera caída comparada con el transformador TA. Esta caída en los voltajes, especialmente en el lado de baja tensión, podría indicar el comienzo de una ligera tensión bajo condiciones de carga más elevadas, pero aun así demuestra una operación eficiente y estable bajo la carga base.

Tabla 4. Transformadores del sistema caso base

Nº	Nombre	Cargabilidad [%]	Voltaje LV [V]	Voltaje HV [V]
1	TA	1,50	0,9984	0,9986
2	TB	38,09	0,9845	0,9882
3	TC	2,54	0,9843	0,9846

Similar al transformador TA, el Transformador TC tiene una cargabilidad del 2,54%, indicando que también está operando bien por debajo de su capacidad total. Los voltajes en el lado de baja y alta tensión son de 0,9843 y 0,9846, respectivamente, mostrando valores muy cercanos a los del transformador TB. Esto sugiere que, aunque TC está sometido a una carga relativamente baja, experimenta condiciones de voltaje similares a TB, lo cual podría ser indicativo de características intrínsecas del transformador o de la red a la que sirve.

4.2. Estudio con el incremento del 25% en la carga

El análisis de los resultados con un incremento de carga del 25% en los transformadores del sistema revela cambios significativos en la operación y rendimiento de estos, en comparación con el caso base.

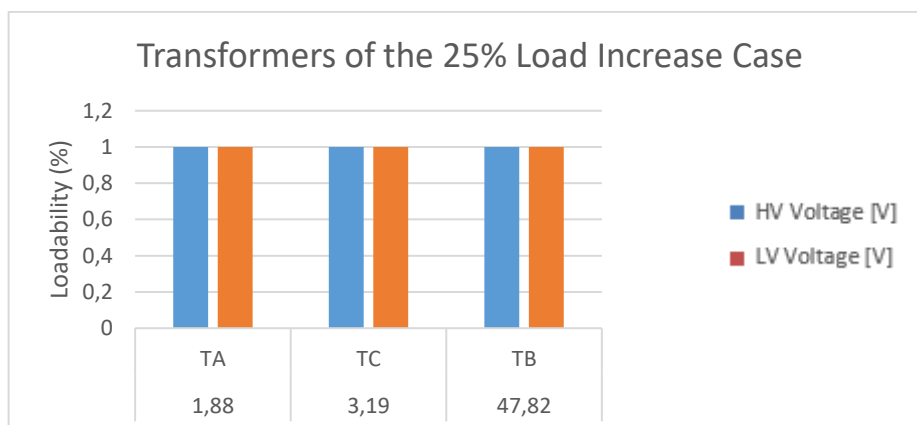
Para el Transformador TA, la cargabilidad aumenta ligeramente de 1,50% a 1,88%. A pesar del incremento en la carga, el transformador sigue operando bien por debajo de su capacidad máxima, manteniendo un alto nivel de eficiencia y estabilidad. Los voltajes en el lado de baja y alta tensión se ajustan mínimamente a 0,9977 y 0,9979, respectivamente. Estos cambios son marginales, lo que indica que TA tiene una excelente capacidad para manejar aumentos de carga sin sufrir efectos adversos significativos en sus perfiles de voltaje.

El Transformador TB experimenta un aumento más notable en su cargabilidad, pasando del 38,09% en el caso base a 47,82% con el incremento del 25%. Esta variación sugiere que TB está asumiendo una carga considerablemente más alta, lo cual se refleja en una reducción de los voltajes en los lados de baja y alta tensión a 0,9801 y 0,9847, respectivamente. Aunque estos valores aún se mantienen dentro de rangos operativos aceptables, la caída de voltaje indica que el transformador podría estar acercándose a sus límites de capacidad, especialmente en escenarios de mayor demanda.

El Transformador TC muestra un incremento en la cargabilidad de 2,54% a 3,19%. Aunque este cambio es proporcionalmente mayor en comparación con el TA, el TC aún opera con una amplia capacidad disponible. Sin embargo, los voltajes en los lados de baja y alta tensión disminuyen a 0,9788 y 0,9791, respectivamente, lo que representa una caída más pronunciada que la observada en TA. Esta reducción de voltaje sugiere que incluso pequeños aumentos en la carga pueden tener un impacto relativamente mayor en el rendimiento de TC, posiblemente debido a su configuración específica o a las características de la red a la que sirve.

Tabla 5. Transformadores del sistema caso 25%

N°	Nombre	Cargabilidad [%]	Voltaje LV [V]	Voltaje HV [V]
1	TA	1,88	0,9977	0,9979
2	TB	47,82	0,9801	0,9847
3	TC	3,19	0,9788	0,9791

**FIGURA 3.** Incremento del 25% en la carga

4.3. Estudio con el incremento del 50% en la carga

El escenario con un incremento de carga del 50% en los transformadores del sistema muestra alteraciones más profundas en su desempeño, lo que ilustra el impacto significativo de la carga adicional simulando la integración extensiva de vehículos eléctricos.

El Transformador TA experimenta un incremento en su cargabilidad hasta el 2,26%, manteniendo aún una operación muy por debajo de su capacidad máxima. Aunque el incremento en la carga es moderado, los voltajes en los lados de baja y alta tensión experimentan una ligera disminución a 0,9969 y 0,9972, respectivamente. Estos cambios, aunque son mínimos, indican que el transformador comienza a sentir el efecto de la carga adicional. No obstante, TA continúa demostrando una robustez excepcional frente a los incrementos de demanda, con margen para soportar aún más carga sin comprometer significativamente su rendimiento.

Para el Transformador TB, la cargabilidad aumenta hasta el 57,65%, reflejando una carga sustancialmente más alta en comparación con los escenarios anteriores. Este

incremento de la carga se traduce en una reducción más pronunciada de los voltajes, con valores de 0,9756 en el lado de baja tensión y 0,9812 en el lado de alta tensión. Estas cifras sugieren que TB está acercándose a un punto crítico de su capacidad operativa, donde la calidad del servicio, especialmente en términos de estabilidad de voltaje, podría verse comprometida bajo futuros incrementos de demanda.

El Transformador TC muestra una cargabilidad del 3,85%, lo que representa un aumento respecto al caso base y al incremento del 25%, pero aún indica que opera con suficiente margen bajo la nueva carga. Sin embargo, los voltajes en los lados de baja y alta tensión disminuyen a 0,9731 y 0,9734, respectivamente, marcando la reducción más significativa entre los escenarios analizados hasta ahora. Aunque TC mantiene una capacidad suficiente para soportar la carga, esta disminución de voltaje destaca la sensibilidad del transformador a incrementos de carga más intensos, lo que podría requerir atención en escenarios de adopción masiva de vehículos eléctricos.

Tabla 6. Transformadores del sistema caso 50%

Nº	Nombre	Cargabilidad [%]	Voltaje LV [V]	Voltaje HV [V]
1	TA	2,26	0,9969	0,9972
2	TB	57,65	0,9756	0,9812
3	TC	3,85	0,9731	0,9734

AUTOR. Auditoria propia

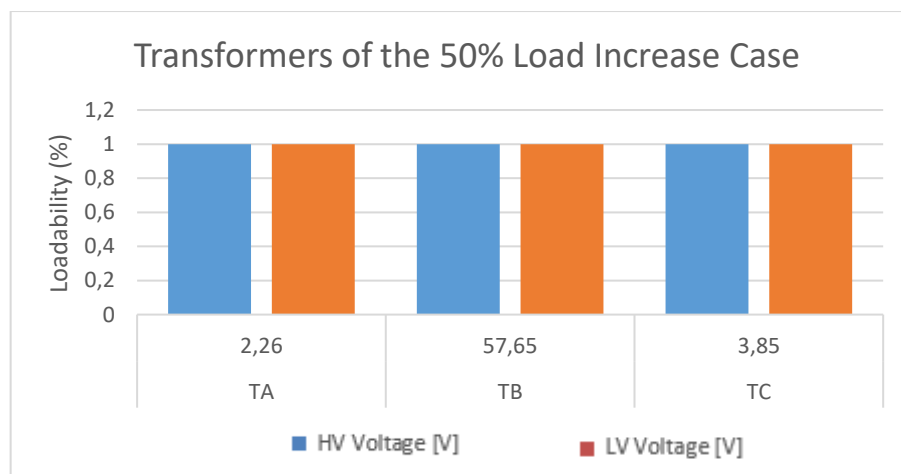


FIGURA 4. Incremento del 50% en la carga

4.4. Estudio con el incremento del 100% en la carga

El escenario con un incremento de carga del 100% en los transformadores del sistema proporciona una visión crítica del potencial impacto que la adopción masiva de vehículos eléctricos tendría sobre la infraestructura eléctrica existente.

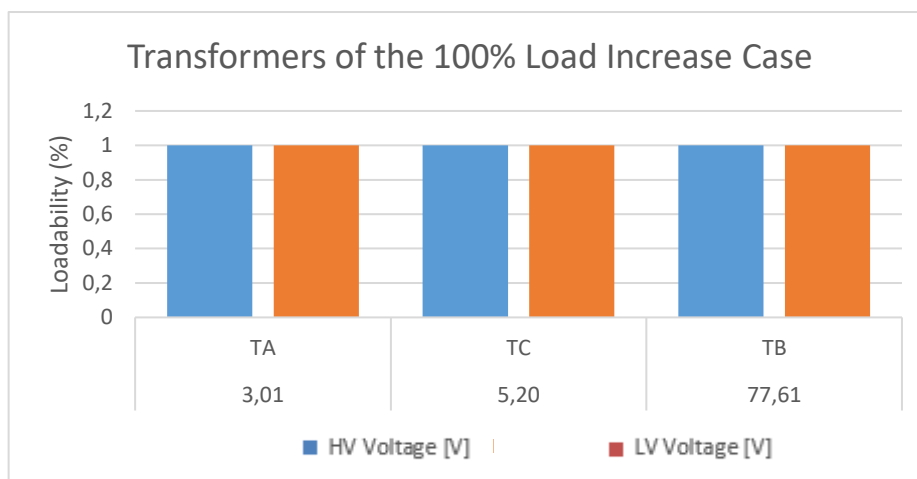
Con una cargabilidad del 3,01%, el Transformador TA muestra un aumento continuo en su utilización; sin embargo, aún se mantiene en un rango manejable y por debajo de su capacidad máxima. Los voltajes en el lado de baja y alta tensión experimentan una disminución a 0,9954 y 0,9957, respectivamente. A pesar de este descenso, TA conserva niveles de voltaje aceptables, demostrando una capacidad notable para absorber incluso duplicaciones de la demanda original sin sufrir impactos severos en su rendimiento. Este transformador se perfila como excepcionalmente robusto y adaptable a aumentos significativos de carga.

El Transformador TB, con una cargabilidad del 77,61%, experimenta una presión operativa considerablemente alta bajo este incremento de carga. Los voltajes en el lado de baja y alta tensión caen a 0,9662 y 0,9738, respectivamente, reflejando una disminución notable que pone en evidencia los desafíos para mantener la estabilidad de voltaje bajo condiciones de carga extrema. Estos valores sugieren que el TB está operando cerca o incluso más allá de sus límites seguros, lo cual podría resultar en problemas de confiabilidad y requeriría medidas correctivas inmediatas para garantizar la continuidad del servicio.

El Transformador TC alcanza una cargabilidad del 5,20%, lo cual, aunque representa un incremento sustancial desde el caso base, aún sugiere que tiene capacidad disponible. Sin embargo, los voltajes en el lado de baja y alta tensión disminuyen drásticamente a 0,9612 y 0,9618, indicando el mayor impacto relativo observado entre los tres transformadores. Esta reducción de voltaje subraya una vulnerabilidad a incrementos de carga considerables, poniendo de manifiesto la necesidad de acciones de fortalecimiento o reconfiguración para este transformador en particular.

Tabla 7. Transformadores del sistema caso 100%

N°	Nombre	Cargabilidad [%]	Voltaje LV [V]	Voltaje HV [V]
1	TA	3,01	0,9954	0,9957
2	TB	77,61	0,9662	0,9738
3	TC	5,20	0,9612	0,9618

**FIGURA 5.** Incremento del 100% en la carga

5. CONCLUSIONES

El Transformador TA muestra una alta capacidad de operación bajo diversas condiciones de carga. Incluso con un incremento del 100% en la carga, su cargabilidad alcanza solo el 3,01%, lo que indica que sigue operando muy por debajo de su capacidad máxima. Además, la disminución de voltaje es mínima, con una caída de solo 0,003 puntos en el voltaje de baja voltaje (de 0,9984 a 0,9954) desde el caso base hasta el escenario de máxima carga, demostrando una excelente robustez y capacidad de adaptación ante incrementos significativos de demanda.

El Transformador TB experimenta un incremento notable en su cargabilidad, llegando al 77,61% con un aumento del 100% en la carga. Esta condición de alta carga resulta en una caída considerable en los voltajes, con una reducción de 0,0183 puntos en el lado de baja voltaje (de 0,9845 a 0,9662). Estos valores indican que el transformador TB está operando cerca de su límite seguro, lo cual podría

comprometer la estabilidad del sistema y requerir intervenciones para mantener un rendimiento confiable.

El Transformador TC, aunque inicialmente operaba con una cargabilidad baja (2,54%), muestra una mayor sensibilidad a los incrementos de carga en comparación con los otros transformadores. Con un incremento del 100% en la carga, la cargabilidad del TC sube a 5,20%, y los voltajes en el lado de baja voltaje disminuyen significativamente en 0,0231 puntos (de 0,9843 a 0,9612). Este comportamiento sugiere que, aunque TC tiene margen para manejar más carga, su rendimiento se ve afectado de manera desproporcionada, lo que podría requerir medidas de optimización o refuerzo de la infraestructura eléctrica en esa área específica.

6. REFERENCIAS

- [1] G. A. Gómez-Ramírez, C. Meza, and S. Morales-Hernández, “Oportunidades y desafíos para la integración de almacenamiento electroquímico en las redes eléctricas centroamericanas,” *Rev. Tecnol. en Marcha*, vol. 34, pp. 70–82, 2021
- [2] J. María J. Campoverde-Pillco, D. Ochoa-Correa, E. Villa-ávila, and P. Astudillo-Salinas, “Reuse of Electrical Vehicle Batteries for Second Life Applications in Power Systems with a High Penetration of Renewable Energy: A Systematic Literature Review,” *Ingenius*, vol. 2024, no. 31, pp. 95–105, 2024
- [3] A. Mohammad, R. Zamora, and T. Lie, “Integration of Electric Vehicles in the Distribution Network: A Review of PV Based Electric Vehicle Modelling,” 2020
- [4] L. Catagnia, “Estimación de costos de energía eléctrica para la recarga de vehículos eléctricos basado en la óptima respuesta de la demanda,” *Univ. Politécnica Sales. Sede Quito*, p. 47, 2020
- [5] C. L. Q. Dávalos and A. Bazan-Aguilar, “Electric vehicles as a way towards the decarbonization: A brief review; [Vehículos eléctricos como una ruta hacia la

descarbonización: Una breve Revisión Sistemática],” *Proc. LACCEI Int. Multi-conference Eng. Educ. Technol.*, vol. 2023-July, 2023

- [6] L. Calero, M. Marinelli, and C. Ziras, “A review of data sources for electric vehicle integration studies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 151, no. August, p. 111518, 2021
- [7] J. S. Lascano, R. Saraguro, C. Quinatoa, J. Tapia, and L. Chiza, “Demand Estimation for an Electric Vehicles Charging Station Through the Application of Probabilistic Methods Estimación de la Demanda de una Estación de Carga para Vehículos Eléctricos Mediante la Aplicación de Métodos Probabilísticos,” no. 20, pp. 52–64, 2023
- [8] P. Barman, L. Dutta, S. Bordoloi, and A. Kalita, “Renewable energy integration with electric vehicle technology: A review of the existing smart charging approaches,” 2023
- [9] J. Galarza-Linares, D. Condezo-Hurtado, B. Saenz-Loayza, and D. Huarac-Rojas, “Evaluación de la red de distribución: conexión del vehículo eléctrico híbrido enchufable,” *Rev. Technol. en Marcha*, vol. 34, pp. 50–62, 2021
- [10] K. Dimitriadou, N. Rigogiannis, S. Fountoukidis, F. Kotarela, A. Kyritsis, and N. Papanikolaou, “Current Trends in Electric Vehicle Charging Infrastructure; Opportunities and Challenges in Wireless Charging Integration,” *Energies*, vol. 16, no. 4, 2023
- [11] P. Fornaro, P. Puleston, and P. Battaiotto, “Electrolinera Para Vehículos Eléctricos: Evaluación del Perfil de Potencia de Turbinas Eólicas Para Estimación de Parámetros en Baterías de Flujo Redox,” 2024

- [12] M. C. C. Cabal, F. C. Aranda, and E. G. Luna, "Critical Review of Tools for Monitoring and Management in Distribution Transformers Before the Integration of Distributed Energy Resources," *Ing.*, vol. 28, no. 1, pp. 1–18, 2023
- [13] O. Apata, P. N. Bokoro, and G. Sharma, "The Risks and Challenges of Electric Vehicle Integration into Smart Cities," *Energies*, vol. 16, no. 14, 2023
- [14] D. Garzón, "Diseño eléctrico de la subestación zumbahua 69/13.8 kV para la empresa eléctrica provincial de Cotopaxi ELEPCO S.A.," pp. 1–17, 2018
- [15] D. G. Orbe and L. F. Salazar, "Estimation and Sensitivity Analysis of Electric Buses Energy Consumption through Microscopic Simulations on Public Transport Lines
Estimación y Análisis de Sensibilidad del Consumo Energético de Buses Eléctricos mediante Simulaciones Microscópicas en línea," no. 21, pp. 105–113, 2024
- [16] S. Akram and Q. ul Ann, "Newton Raphson method calculator," *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 6, no. 7, pp. 1748–1752, 2015, [Online]. Available: