

**UNIVERSIDAD EAN
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE PROYECTOS
PROYECTO DE GRADO**



**ANÁLISIS DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA RED ELÉCTRICA DE MEDIA
TENSIÓN ANTE LA INCLUSIÓN DE ESTACIONES DE CARGA PARA VEHÍCULOS
ELÉCTRICOS**

AUTOR:

GARCIA MARTINEZ BRYAN

BOGOTÁ D.C., 16 DE OCTUBRE DE 2023

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO.....	2
RESUMEN	3
ABSTRAC	4
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
Antecedentes del problema	6
Descripción del problema	7
OBJETIVOS	9
Objetivo general.....	9
Objetivos específicos	9
JUSTIFICACIÓN	10
MARCO TEÓRICO.....	11
METODOLOGIA	29
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	32
Escenario.....	36
Simulación con cargador de baterías integrando un rectificador de 12 pulsos.....	37
CONCLUSIONES	40
REFERENCIAS.....	43

RESUMEN

Este informe resume la situación con respecto al conocimiento y desafíos relacionados con la introducción a gran escala de la electromovilidad en la red eléctrica. El contenido abarca una perspectiva sistémica en cuanto a los desafíos y efectos que la creciente cantidad de cargas asociadas a la electromovilidad plantea al sistema eléctrico actual. A partir de esto, se abordan una pregunta importante con el fin de prever los impactos futuros positivos y negativos.

El enfoque se centra en los posibles efectos en las redes de media tensión, principalmente explorando comportamientos de calidad de la potencia eléctrica de la red. Para ello se aborda el siguiente problema: distorsión de forma de onda (armónicos de tensión y de corriente) y estabilidad del sistema eléctrico.

A partir de las evidencias encontradas por medio de una simulación en el software etap, se observa que el contenido armónico de la corriente inyectada por los vehículos eléctricos durante la carga no es despreciable, aunque su magnitud es baja, puede agregarse a los armónicos producidos por otras cargas conectadas en el sistema. Puntualmente, la distorsión total armónica de la onda de tensión cumple con los límites de la norma (Committee of the IEEE Power & Society, 2014). Por otro lado, la distorsión armónica total de la onda de corriente no cumple con estos límites establecidos en la norma debido a las magnitudes de las corrientes armónicas 7 y 13. Por tal razón, se podría presentar fallas en el sistema como deterioro en los aislamientos eléctricos por aumento en la temperatura de operación nominal.

Otras evidencias de este informe proporcionan apoyo adicional para futuras discusiones y debates sobre los impactos de la electromovilidad en el sistema eléctrico.

***Palabras Clave:** Armónicos, electricidad, movilidad, vehículos, carga, rectificadores, inversores, ingeniería, distorsión, onda, tensión, corriente, potencia, análisis, temperatura y límite.*

ABSTRAC

This report summarizes the situation regarding knowledge and challenges related to the large-scale introduction of electromobility into the electricity grid. The content covers a systemic perspective regarding the challenges and effects that the growing number of loads associated with electromobility poses to the current electrical system. From this, an important question is addressed in order to foresee future positive and negative impacts.

The focus is on the possible effects on medium voltage networks, mainly exploring network electrical power quality behaviors. To do this, the following problem is addressed: waveform distortion (voltage and current harmonics) and stability of the electrical system.

From the evidence found through a simulation in the etap software, it is observed that the harmonic content of the current injected by electric vehicles during charging is not negligible, although its magnitude is low, it can be added to the harmonics produced by other connected loads in the system. Specifically, the total harmonic distortion of the voltage wave meets the

limits of the standard (Committee of the IEEE Power & Society, 2014). On the other hand, the total harmonic distortion of the current wave does not comply with these limits established in the standard due to the magnitudes of the 7th and 13th harmonic currents. For this reason, failures could occur in the system such as deterioration in the insulation. electrical due to increase in the nominal operating temperature.

Other evidence from this report provides additional support for future discussions and debates on the impacts of electromobility on the electricity system.

Keywords: *Harmonics, electricity, mobility, vehicles, charging, rectifiers, inverters, engineering, distortion, wave, voltage, current, power, analysis, temperature and limit.*

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Antecedentes del problema

El problema de la distorsión armónica debido a la inyección de corrientes armónicas por cargas no lineales es un tema que ha sido estudiado y documentado en el campo de la ingeniería eléctrica durante varias décadas:

- Década de 1960: A medida que las cargas no lineales, como rectificadores y convertidores, se volvieron más comunes en la industria, se observaron por primera vez los efectos de la distorsión armónica en los sistemas eléctricos. Estos efectos incluían aumento de la temperatura en transformadores y conductores, y mal funcionamiento de equipos sensibles a la calidad de la energía (Fuchs E & Masoum M, 2008).
- Década de 1970: Se comenzaron a desarrollar estándares y normativas para abordar la distorsión armónica, como IEEE 519, que proporcionaba directrices para limitar la cantidad de armónicos permitidos en sistemas eléctricos (Fuchs E & Masoum M, 2008).
- Década de 1980: A medida que la electrónica de potencia avanzaba y se volvía más omnipresente en aplicaciones como la industria y la electrificación del transporte, los problemas de distorsión armónica se hicieron más prominentes. Se observaron casos de sobrecalentamiento en transformadores y equipos, lo que

llevó a un mayor interés en la mitigación de armónicos (Fuchs E & Masoum M, 2008).

- Década de 1990: La creciente preocupación por la calidad de la energía eléctrica llevó al desarrollo de tecnologías de filtro y dispositivos activos para mitigar los armónicos en los sistemas eléctricos. Estos incluyen filtros armónicos pasivos y dispositivos de compensación de potencia reactiva (Fuchs E & Masoum M, 2008).
- Década de 2000 en adelante: Con la expansión de las energías renovables y la adopción de vehículos eléctricos, los sistemas eléctricos se volvieron aún más susceptibles a la distorsión armónica debido a la variabilidad de la carga. Se ha continuado investigando y desarrollando tecnologías de mitigación de armónicos para abordar estos desafíos (Gupta et al., 2023).

En resumen, a lo largo de las décadas, se ha acumulado una comprensión significativa sobre los efectos de la distorsión armónica en los sistemas eléctricos y se han desarrollado soluciones para mitigar estos efectos. La continua evolución de la tecnología y la creciente demanda de energía limpia plantean nuevos desafíos y oportunidades en este campo en constante desarrollo.

Descripción del problema

Debido al aumento de estaciones de carga para vehículos eléctricos, es necesario comprender

cómo afectará la calidad de la potencia eléctrica en términos de distorsión armónica. Para ello se analiza la red eléctrica de media tensión en el punto de acople común (PCC).

Esto se debe a que los dispositivos de electrónica de potencia, como los rectificadores AC/DC, son cargas eléctricas que tienen un comportamiento no lineal. Esta no linealidad podría causar perturbaciones en las ondas de tensión y de corriente existentes en la red y manifestarse a través de los siguientes posibles síntomas:

- Sobrecarga en transformadores y conductores de alimentación del sistema debido a la presencia de corrientes armónicas. Esto genera un aumento en la temperatura nominal de funcionamiento de estos elementos, y en consecuencia puede deteriorar el aislamiento de los elementos eléctricos.
- En el punto de acople común (PCC), donde se conectan las estaciones de carga a la red eléctrica, se podría presentar una distorsión importante en la forma de onda de tensión. En consecuencia, alteraría los niveles de calidad de la potencia eléctrica que los usuarios residenciales, comerciales e industriales conectados a la red necesitan para su funcionamiento adecuado.

Por último, de acuerdo con lo expuesto anteriormente se plantea el siguiente interrogante:

¿Cómo afectaría la inclusión de estaciones de carga para vehículos eléctricos en la red eléctrica los límites de distorsión armónica del estándar IEEE 519-2014?

OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar la distorsión armónica en el punto de acople común PCC entre la red eléctrica de media tensión y una estación de carga para vehículos eléctricos mediante una simulación en el software etap tomando como criterio los límites de THD y TDD del estándar IEEE 519-2014 con el fin de predecir posibles efectos de calidad de la potencia eléctrica en el sistema.

Objetivos específicos

- Identificar la topología eléctrica de una estación de carga para vehículos eléctricos por medio de revisión bibliográfica para conocer los elementos que componen los circuitos eléctricos.
- Establecer el modelo del sistema eléctrico desde el punto de acople común PCC hasta la estación de carga por medio del software etap con el fin de simular las variables de distorsión armónica THD y TDD.
- Comparar los valores porcentuales de THD y TDD arrojados por la simulación con los límites del estándar IEEE 519-2014 para identificar posibles alteraciones en la calidad de la potencia eléctrica en el PCC.
-

JUSTIFICACIÓN

La movilidad eléctrica se ha incentivado con el fin de abordar y mitigar los problemas ambientales y de movilidad en las ciudades (Gupta et al., 2023). Para lograr este objetivo, un hito importante es planificar la construcción de los sistemas de carga para vehículos eléctricos con el fin de garantizar el abastecimiento de energía y diferentes puntos de la malla vial.

Esta investigación es de gran relevancia para varios actores los cuales hacen parte del sistema de manera directa o indirecta pero que se ven afectados por el comportamiento del sistema. Por tal motivo, les permitirá a los actores predecir y anticiparse a los efectos que puede traer una mala calidad de la potencia eléctrica. Algunos de estos actores son:

- El operador de las redes eléctricas: pueden anticipar los efectos con el fin de garantizar la estabilidad, confiabilidad, flexibilidad del sistema eléctrico y la calidad de servicio a nivel regulatorio.
- Los usuarios industriales, comerciales y residenciales que podrían estar conectados en los puntos de acoplamiento común PCC del sistema con el fin de garantizar un funcionamiento óptimo de sus equipos como líneas de producción, electrodomésticos etc.

Como utilidad metodológica, tiene una aplicabilidad en la etapa de diseño debido a que se requiere mitigar distorsiones en la red eléctrica que implicará buscar soluciones como la integración en el sistema de filtros pasivos o activos.

Por último, esta investigación se relaciona con la especialización en gerencia de proyectos debido a que se requiere gerenciar la construcción de estaciones de carga de forma masiva con el fin de incentivar el uso de estos. Por tal razón, es una necesidad metropolitana y regional que requiere gerentes con criterios técnicos. Además, aportará un criterio en el campo de la gerencia de ingeniería y se enfocará en aplicar conocimientos relacionados con la electricidad con énfasis en calidad de la potencia eléctrica.

MARCO TEÓRICO

Para llevar a cabo el análisis de armónicos, es esencial comprender los elementos los generan y los conceptos relacionados. Un modelado preciso de estos elementos en un sistema requiere un conocimiento previo de circuitos eléctricos, electrónica, análisis de señales y calidad de la potencia eléctrica. A continuación, se explican estos conceptos:

Concepto de Armónico: Según los autores cualquier forma de onda periódica se puede descomponer en una serie de ondas sinusoidales con diferentes frecuencias y fases. Esta descomposición se conoce como espectro armónico de la onda. La frecuencia principal que para este caso es de 60 Hz de la onda sinusoidal se llama fundamental, y las frecuencias de las demás ondas armónicas son múltiplos enteros de esta frecuencia fundamental (Committee of the IEEE Power & Society, 2014). Los armónicos se generan cuando una carga se conecta a una fuente de suministro de corriente alterna, si la corriente absorbida es sinusoidal y está en fase con la

tensión, se llama carga lineal. Si la corriente no es sinusoidal, contiene armónicos y se denomina carga no lineal (Eléctricos et al., n.d.).

Rectificador de 12 pulsos: El rectificador de 12 pulsos se utiliza en aplicaciones de alta potencia y se obtiene mediante la conexión en serie de dos rectificadores de 6 pulsos alimentados por dos transformadores los cuales uno tiene configuración Y-Y y el otro Y-D (Carrillo González, 2003). Esta configuración crea un desfase de 30 grados entre los voltajes de alimentación, lo que resulta en una corriente de entrada más sinusoidal y una menor distorsión armónica debido a la cancelación de armónicos.

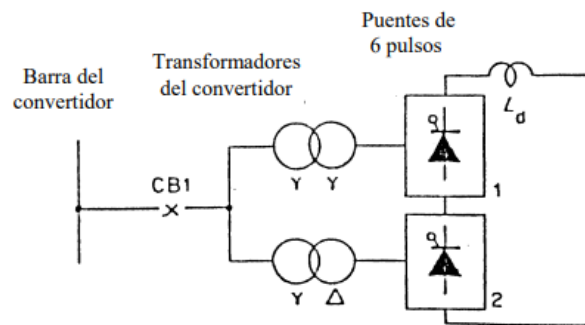


Ilustración 1 Conexión típica de un rectificador de 12 pulsos. Fuente: Armónicas en Sistemas Eléctricos de Potencia, capítulo 3 - fuentes de armónicas.

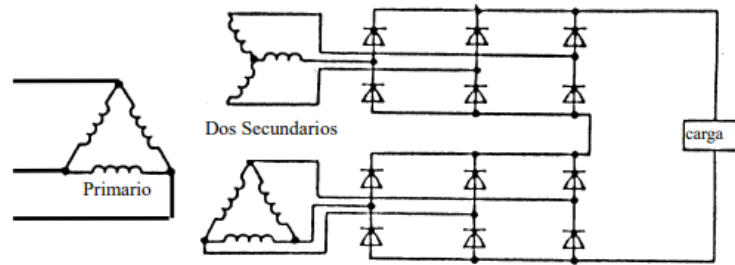


Ilustración 2 Conexión detallada de un rectificador de 12 pulsos. Fuente: Armónicas en Sistemas Eléctricos de Potencia, capítulo 3 - fuentes de armónicas.

Análisis de un Rectificador de 12 Pulsos: El análisis de un rectificador de 12 pulsos se basa en su configuración, que consta de dos rectificadores de 6 pulsos en serie (ABB, 2014). La corriente en el primario del transformador, es decir, la corriente absorbida de la red, es la suma de las corrientes de ambos rectificadores de 6 pulsos (ABB, 2014). Esto también se aplica al voltaje en la carga, que es la suma de los voltajes individuales de cada rectificador como se indica en la siguiente ecuación (Carrillo González, 2003):

$$V_d = V_{p1} + V_{p2} = \frac{6\sqrt{3}}{\pi} * E_m * \frac{\cos(\alpha) + \cos(\alpha + \mu)}{2} \quad (1)$$

Así mismo la siguiente ecuación muestra cómo se calcula el voltaje en la carga y las corrientes armónicas en el rectificador de 12 pulsos:

$$I_a = 2 * \frac{2\sqrt{3}}{\pi} * I_d \left\{ \cos(\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \frac{1}{13} \cos(13\omega t) - \frac{1}{23} \cos(23\omega t) + \frac{1}{25} \cos(25\omega t) - \dots \dots \right\} \quad (2)$$

Corrientes Armónicas en un Rectificador de 12 Pulsos: El análisis de las corrientes en un rectificador de 12 pulsos revela que algunas armónicas se eliminan debido a la conexión en serie de los dos rectificadores de 6 pulsos (ABB, 2014). Esto se debe a la cancelación de armónicos de igual orden con signos opuestos en las corrientes de los transformadores en estrella y delta (ABB, 2014). Como resultado, solo las armónicas del orden $(12k \pm 1)$ circulan en el secundario del transformador, mientras que las demás no penetran en la red (Carrillo González, 2003).

Ángulo de Conmutación y Corrientes no Ideales: En la práctica, los transformadores de reducción que alimentan los rectificadores presentan inductancias que limitan las variaciones de corriente y generan ángulos de conmutación en las formas de onda de corriente. Esto modifica la amplitud y la secuencia de los armónicos presentes en las ondas, pero la variación en la amplitud no es significativa (Carrillo González, 2003).

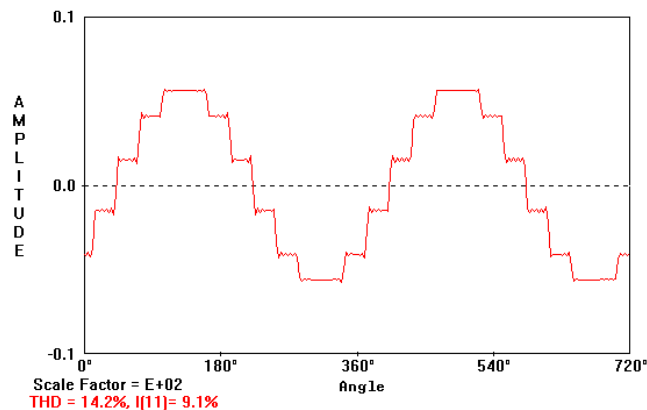


Ilustración 3 Onda rectificada

En resumen, se analizan los efectos de la distorsión armónica generada por cargas no lineales, como los rectificadores de 12 pulsos, y se considera tanto el comportamiento ideal como las condiciones no ideales en la práctica (Mendoza & Rolando, 2015).

Tabla 1 Componentes armónicas

Orden	11	13	23	25	35	37	47	49
%Fund.	9.0	7.6	4.3	4.0	2.8	2.7	2.1	2.0

Fuente: Mendoza, Rolando, 2015. Corrientes inyectadas por un rectificador de 12 pulsos.

La Distorsión Armónica Total (THD)

Es una medida que evalúa la distorsión en los sistemas de potencia eléctrica causada por la combinación de armónicos con la frecuencia fundamental. Esta distorsión está relacionada directamente con las frecuencias y amplitudes de las corrientes armónicas. La THD cuantifica la distorsión total de las corrientes y/o tensiones debido a la contribución de todas las componentes individuales. Para calcularla, se realiza una sumatoria de los cuadrados de cada componente individual, se toma la raíz cuadrada de esta suma y se divide por la componente fundamental (ya sea corriente o tensión) (Carrillo González, 2003). Luego, el resultado se multiplica por 100 para expresarlo como un porcentaje. La fórmula para calcular la THD se muestra a continuación (Carrillo González, 2003):

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n I_i^2}}{I_f} * 100 \quad (3)$$

El modelamiento de elementos para el análisis de armónicos en un sistema de potencia implica representar de manera precisa los componentes que tienen un mayor impacto en dicho sistema. Esto se logra creando modelos que se asemejen lo más posible a los componentes físicos reales. Por ejemplo, las fuentes generadoras y las máquinas rotativas pueden modelarse como una combinación de inductancia y resistencia, utilizando la reactancia de secuencia negativa para obtener la inductancia.

En el caso de los conductores, su modelación puede variar según la frecuencia de los armónicos y las características de los conductores. Para armónicos de baja frecuencia y conductores con baja capacitancia, se pueden representar como una impedancia RL. Para conductores de media tensión, redes de distribución y líneas de transmisión, es posible utilizar modelos PI o de parámetros distribuidos (Mendoza & Rolando, 2015).

En cuanto a los transformadores, su modelado puede realizarse mediante una resistencia en serie (R_s) y una combinación en paralelo de inductancia y otra resistencia (R_p) (Alberto R et al., 2003).

Por otro lado, las cargas que generan armónicos, como puentes rectificadores, inversores y convertidores de electrónica de potencia, pueden modelarse de diversas maneras:

Creando un modelo detallado del componente generador de armónicos, como los puentes rectificadores o inversores.

Utilizando los modelos incorporados en programas de simulación especializados.

Representando las cargas generadoras de armónicos como fuentes de corriente, lo que resulta útil cuando se trabajan con mediciones reales de la carga, ya que se utiliza una fuente de corriente con el valor medido para cada uno de los armónicos(Alberto R et al., 2003).

La nueva era del transporte limpio y eficiente, con avances en tecnología, plantea nuevos desafíos sociales y técnicos para la red eléctrica moderna. La mayoría de las implementaciones de la electromovilidad prevén una gran cantidad de estaciones de carga para vehículos eléctricos (VE) y la electrificación de carreteras alimentadas desde la red de distribución de baja o media tensión (Shimi et al., 2021). El aumento de la carga proveniente de la infraestructura de carga puede establecer límites en la red eléctrica y tener un impacto negativo en otros clientes conectados a la misma (Shimi et al., 2021).

Existe un conocimiento y experiencia limitados sobre la interacción y compatibilidad entre la infraestructura de carga y la red eléctrica, sin embargo, ha habido investigaciones y estudios sobre cómo la carga a gran escala de vehículos eléctricos afecta la red, especialmente en términos de sobrecarga y reducción de voltaje. Por otro lado, hay una cantidad limitada de investigación sobre cuántas perturbaciones puede manejar la red (capacidad de alojamiento), pero hay investigación importante sobre cómo la carga coordinada de vehículos eléctricos (carga inteligente) puede reducir el impacto en la red. Aunque existen publicaciones sobre las emisiones debidas a la carga de VE en la literatura, la rápida innovación tecnológica lleva a un patrón de

emisiones completamente diferente, lo que introduce nuevos desafíos para los operadores de la red y la comunidad de investigación.

El principal desafío aquí es obtener modelos adecuados sobre la carga en función del tiempo (Shimi et al., 2021). Para las corrientes armónicas, los cálculos son más complicados porque es necesario incluir efectos de propagación y agregación, junto con el efecto de dispositivos cercanos en las emisiones de los demás (emisiones primarias y secundarias). También es incierto cuáles serán las emisiones de la futura infraestructura de carga. Aquí hay muchos desafíos adicionales, ya que existen similitudes con los desafíos al conectar otros tipos de equipos nuevos a la red eléctrica.

Existen varias similitudes en términos del impacto en la red eléctrica entre la infraestructura de carga y los sistemas fotovoltaicos. En cuanto a estos últimos, se han realizado numerosos estudios sobre cuánto pueden manejar las redes eléctricas, sin embargo, se necesita más investigación para determinar la capacidad de alojamiento de los VE considerando la generación de energía renovable, la temperatura ambiente, las instalaciones de carga grandes, la calificación de línea dinámica, etc. (Shimi et al., 2021).

Las consecuencias de la transición a gran escala a la electromovilidad también llevarán a la falta de capacidad de producción y a la congestión de la red de transmisión durante ciertas horas de alta carga (Shimi et al., 2021). La solución a esto es la participación de los VE en el mercado eléctrico. Sin embargo, una consecuencia de esto es que habrá una mayor

sincronización de los VE con posibles consecuencias negativas para las redes de distribución. Existe un conocimiento muy limitado sobre estas consecuencias.

Se debe tener en cuenta que estos sistemas de carga se pueden desarrollar en las siguientes áreas:

- Carga en el hogar: Los propietarios de vehículos eléctricos pueden cargar sus vehículos en casa utilizando enchufes de nivel 1 o estaciones de carga de nivel 2.
- Carga pública: Estaciones de carga ubicadas en lugares públicos, como estacionamientos, centros comerciales y estaciones de servicio.

Existe la carga rápida la cual se encuentra en estaciones de carga de alta potencia que pueden cargar un vehículo eléctrico en un corto período de tiempo, generalmente de 20 a 30 minutos.

El nivel de emisión de armónicos de corriente de la carga de vehículos eléctricos (VE) depende de la topología del circuito del cargador, el nivel de potencia, la distorsión del voltaje de suministro (distorsión de fondo) y la impedancia de la red eléctrica. Los rectificadores de diodo más simples emiten un alto nivel de armónicos de corriente, pero con mejoras en sus circuitos y técnicas de control, los nuevos cargadores tienen una emisión armónica mucho menor (Shimi et al., 2021). Un ciclo de carga completo se puede dividir en dos etapas: corriente constante (CC) y voltaje constante (CV) (Shimi et al., 2021). La etapa de CC es el período principal de carga y va desde cero hasta casi el 80% de la capacidad de carga seguido de CV hasta que esté completamente cargado (Shimi et al., n.d.).

Los cargadores de VE se comportan de manera diferente en cada etapa desde el punto de vista armónico. Durante la CC, tienen una baja distorsión armónica, pero durante la CV, la forma de onda de la corriente es más distorsionada (Shimi et al., 2021).

El efecto de cancelación debido a la diversidad de VE y al estado de carga de las baterías desempeña un papel significativo en la agregación de cargadores lentos mientras que los cargadores rápidos (generalmente más de 40 kW) tienen una ubicación fija en la red en comparación con los cargadores lentos, por lo que es más fácil gestionarlos y controlarlos (Shimi et al., 2021). La mayoría de las estaciones de carga utilizan la misma marca y modelo de cargadores de VE, pero, aun así, la diversidad de VE y el estado de carga de las baterías pueden agregar cierto nivel de incertidumbre a los estudios armónicos en lo que respecta a los cargadores rápidos (Shimi et al., 2021).

Los estudios armónicos de VE también se pueden categorizar en estudios deterministas y estudios estocásticos con la modelización del cargador en el dominio temporal y en el dominio de la frecuencia, la investigación del efecto de cancelación y el impacto del voltaje de fondo en la emisión armónica, así como la estimación de la capacidad de alojamiento de VE en términos de armónicos, son los temas más discutidos en los estudios deterministas (Shimi et al., 2021). En los enfoques estocásticos, para obtener resultados más realistas, se incorporan diferentes tipos de incertidumbre, como la diversidad de VE, la diversidad de estados de carga de las baterías, la variación del voltaje de fondo, la ubicación del cargador en la red, etc., en el modelo.

En el trabajo de Shimi S, Letha S y Bollen M (2021) se investigaron varios aspectos relacionados con el servicio y la calidad de la energía en las redes de media y baja tensión desde el punto de vista de las empresas de transmisión, distribución, servicios públicos y clientes. A partir de esto, resumieron los impactos y desafíos en diferentes secciones.

Se informa de la presencia de distorsiones en la forma de onda, como armónicos, Inter armónicos y supra armónicos durante la carga de vehículos eléctricos (VE) y se verifican mediante mediciones. Se intentó determinar cómo se agregan y propagan en una red de baja y media tensión con múltiples VE integrados. Inicialmente, se estudió la función de densidad de probabilidad (PDF) de los armónicos de orden inferior dominantes.

Los autores encontraron que es diferente para diferentes ciclos de carga debido a diversas incertidumbres, como el estado de carga de la batería, el nivel de distorsión de fondo, la velocidad de carga, la tecnología electrónica de potencia utilizada, etc. Por lo tanto, se necesita desarrollar un nuevo método para abordar este problema (Shimi et al., 2021). El estudio de agregación de Inter armónicos concluyó que el valor pico de agregación depende de la aleatoriedad del número de VE que se están cargando. Con un número aleatorio de VE conectados a la red, la distribución es una distribución de valores extremos y pierde su asimetría, volviéndose normal para un número constante de VE (Shimi et al., 2021).

En el rango de supra armónicos, se destaca la necesidad de mediciones unificadas, inmunidad/estandarización y conocimiento de interferencia para estudios de agregación. Aunque la magnitud de la corriente de supra armónicos es muy baja, se superponen a las emisiones primarias y secundarias mientras se propagan a través de la tierra protectora (PE) y causan desconexiones innecesarias de los interruptores diferenciales (RCD). También se dedujo que los VE conectados a instalaciones con toma de tierra TN-C-S de alta capacidad y baja resistencia experimentarán una corriente de fuga alta.

Los cargadores de VE no se ven afectados por caídas de voltaje superficiales (Shimi et al., 2021). Al considerar la red con cables subterráneos en transmisión y distribución, incluso una falla con una caída superficial causa grandes transitorios al comienzo de la caída debido a la conmutación de la capacitancia del cable (Shimi et al., 2021). Cuando esta caída se propaga a la red de distribución, puede amplificarse (red de alta impedancia) en función de la frecuencia resonante (Shimi et al., 2021). Por lo tanto, incluso una caída superficial con un salto de ángulo de fase (PAJ) de 20 grados tiene un gran impacto en la carga de VE y la vida de la batería (Shimi et al., 2021). Los VE mientras se descargan son más sensibles a las caídas asimétricas con un salto de ángulo de fase, ya que causan sobretensiones y oscilaciones altas en el enlace de corriente continua del cargador de VE y este impacto es notable cuando menos cantidad de VE están cargando (Shimi et al., 2021).

El parpadeo de la luz debido a la rápida variación de voltaje causada por la carga de VE depende principalmente del número de VE conectados, la topología de las lámparas LED

utilizadas por los clientes y la impedancia de la red; aunque el parpadeo es más prominente en una red más débil (alta impedancia de la red), depende principalmente de la topología de la lámpara (Shimi et al., 2021). Las lámparas con corrección activa del factor de potencia (evaluado en función de la forma de onda de la corriente) son más sensibles a la rápida variación de voltaje y causan parpadeo de luz (Shimi et al., 2021).

La capacidad de alojamiento de vehículos fotovoltaicos la determinaron mediante un enfoque estocástico considerando el fenómeno de sub-tensión (Shimi et al., 2021).

La investigación concluyó que la carga durante el día es menor que el impacto durante la noche y también depende del factor de coincidencia relativa entre PV y EV; la probabilidad de sub-tensión en sistemas monofásicos y trifásicos es muy pequeña durante el día y alta durante la noche y la probabilidad de una infracción de sub-tensión aumenta con el aumento de la potencia de carga y el nivel de penetración (Shimi et al., 2021).

El estudio de capacidad de alojamiento cuantificado en términos de reducción (hr/año), determina que la penetración de vehículos eléctricos de gran potencia se puede aumentar gradualmente con el incremento de la reducción (hr/año) teniendo en cuenta el límite social y económico; considerando las condiciones de sobrecarga y teniendo en cuenta el perfil de carga del norte de Suecia, se cuantifica un excedente de capacidad de alojamiento, pero con cierto riesgo durante los inviernos (Shimi et al., 2021).

El estudio también calcula la fiabilidad, índice para determinar la ubicación óptima para la integración de vehículos eléctricos con respecto al valor del índice promedio de energía no suministrada (AENS). De acuerdo con los autores, una investigación similar investigó la capacidad de alojamiento utilizando clasificación de línea dinámica probabilística (DLR) para el norte de Suecia durante el período 2011 y 2018 y mostró que la muestra al usar DLR la capacidad mínima aumentará hasta un 56% de la capacidad de transferencia máxima con clasificación estática durante el período de carga máxima en invierno (Shimi et al., 2021).

Dado que el estudio en tiempo real se basa en un conocimiento perfecto de los parámetros ambientales, es importante tener en cuenta la incertidumbre en el cálculo del DLR utilizando un enfoque probabilístico (Shimi et al., 2021). El DLR probabilístico, donde la probabilidad de sobrecarga se utiliza como criterio de decisión, puede proporcionar más capacidad de alojamiento en términos de número de vehículos eléctricos y este permitirá un equilibrio continuo, hora tras hora, entre aceptar cierto nivel de riesgos o descuidarlos (Shimi et al., 2021). Un estudio sobre el impacto de la temperatura en la capacidad de alojamiento de vehículos eléctricos dedujo que al introducir el coeficiente de temperatura se produce una disminución de alrededor del 30 % en la capacidad de alojamiento durante los meses más fríos debido a la rápida descarga de las baterías(Rajs et al., 2022).

Por lo tanto, para mantener la confiabilidad de la red, el planificador operativo debe incluir esta carga excedente y los riesgos en la red junto con el factor de temperatura inferido de los estudios anteriores mientras planifica y realiza medidas de mitigación en términos de

reducción y operación no segura teniendo en cuenta la límite social y económico (Shimi et al., 2021).

Los cargadores de baterías de vehículos eléctricos (EV) son ejemplos de cargas no lineales que introducen armónicos en la red eléctrica de distribución. Por lo tanto, es crucial cuantificar esta distorsión armónica y analizar su impacto (Hernandez, n.d.). En un escenario ideal, el voltaje y la corriente suministrados a la carga tendrían formas de onda perfectamente sinusoidales. Sin embargo, en la vida real, esto no ocurre debido a los armónicos, que son voltajes o corrientes sinusoidales con frecuencias específicas que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental como 50 o 60 Hz (Mendoza & Rolando, 2015). Cuando estos armónicos se combinan con la componente fundamental, causan distorsión en el sistema. Las corrientes armónicas siguen diferentes caminos, ya que las impedancias en los sistemas varían según la frecuencia (Hernandez, n.d.). Por lo tanto, estas corrientes fluirán por la ruta que tenga la menor resistencia (Hernandez, n.d.).

La norma IEEE Std 519-1992, y su actualización del 2014, es un documento de referencia que se utiliza para regular las distorsiones armónicas y garantizar la correcta aplicación de los límites de estas distorsiones en los sistemas de energía eléctrica. En el contexto de la calidad de la energía, los aspectos más importantes a considerar son los valores de voltaje y corriente. Para que se pueda hablar de una energía de alta calidad, estos valores deben estar dentro de los límites establecidos en las normativas nacionales e internacionales.

En otra investigación realizada por el autor Hernandez D (2018), menciona que, como carga no lineal, los vehículos eléctricos introducen componentes armónicas en el sistema eléctrico de distribución (Hernandez, n.d.). El autor demostró que el armónico que tiene el mayor impacto negativo en el sistema es el tercer armónico y el séptimo armónico en voltajes, y el tercer armónico y el quinto armónico en corrientes (Hernandez, n.d.). La presencia de armónicos impares es una consecuencia esperada en todas las cargas no lineales y rotativas (Hernandez, n.d.).

El autor destaca la Transformada Hilbert-Huang por su eficacia y superioridad. Menciona que la herramienta matemática es especialmente adecuada para analizar señales que son tanto no lineales como no estacionarias, en contraste con la Transformada de Fourier, que tiene limitaciones en la manipulación de datos que varían con el tiempo (Hernandez, n.d.). La Transformada de Hilbert-Huang descompone la señal en funciones llamadas Modos de Función Empírica (IMF), lo que permitió obtener la frecuencia instantánea de la señal y analizar variables sin necesidad de un procesamiento previo (Hernandez, n.d.). Esto le facilitó la interpretación de los resultados y la determinación del impacto de cada armónico en el sistema de distribución.

De igual manera, menciona que, en comparación con la Transformada de Fourier, que se enfoca en identificar datos atípicos o frecuencias muy altas en las series de datos, la Transformada de Hilbert-Huang presenta y localiza estos elementos en tiempo real (Hernandez, n.d.). Además, es capaz de detectar modos de oscilación de frecuencias relevantes en la señal y los resultados muestran que la THH es superior a la Transformada Rápida de Fourier en términos de identificar características no estacionarias en los datos.

Los autores concluyen que La Transformada de Hilbert-Huang es una herramienta poderosa y versátil que brinda información local, adaptable y eficiente directamente desde los datos, sin requerir suposiciones de linealidad o estacionariedad y esto la convierte en la elección más adecuada para analizar datos no estacionarios y no lineales, como los obtenidos de vehículos eléctricos en este estudio.(Hernandez, n.d.).

Por otro lado, los autores (Moses V et al., 2023) han Propuesto una estrategia eficiente para la asignación de cinco estaciones de carga rápida para vehículos eléctricos en un sistema de distribución, utilizando un algoritmo de PSO multiobjetivo modificado con el objetivo de minimizar las pérdidas de energía y la desviación mínima de voltaje (Moses V et al., 2023). El algoritmo MOPSO propuesto demuestra consistencia en la obtención de una solución óptima global y puede aplicarse a una red más extensa (Moses V et al., 2023). Además, mencionan que un análisis de series temporales del sistema de distribución bajo diferentes condiciones de carga y carga de vehículos eléctricos demuestra que el método propuesto es efectivo para reducir las pérdidas de energía y la desviación de voltaje (Moses V et al., 2023). Los autores desarrollaron un modelo de costos para las estaciones de carga de vehículos eléctricos considerando la tarificación dinámica en tiempo real establecida por la compañía eléctrica y validaron la predicción del precio de carga de vehículos eléctricos utilizando un modelo ARIMA; esto puede utilizarse para ayudar al operador de la estación de carga de vehículos eléctricos a pronosticar los beneficios y ofrecer descuentos a los clientes de vehículos eléctricos en diferentes momentos para aumentar la utilización y la rentabilidad (Moses V et al., 2023). También planean investigar

más a fondo el sistema para diversos modelos de vehículos eléctricos y clasificaciones de cargadores, así como realizar un análisis comparativo exhaustivo del método propuesto con otros métodos de optimización populares que se evidencien en trabajos en trabajos futuros.

Este trabajo aborda los aspectos financieros de las estaciones de carga de vehículos eléctricos en condiciones de tarificación en tiempo real, para ello utilizaron un modelo ARIMA para pronosticar precios dinámicos encontrando un valor de R-cuadrado alto de 0.9999 (Moses V et al., 2023). Este hallazgo abre posibilidades para que los operadores de estaciones de carga creen estrategias promocionales para fomentar la utilización y aumentar las ganancias.

Para la simulación de datos sobre la llegada de vehículos eléctricos a la estación de carga, los autores consideraron algunas suposiciones, como un número aleatorio de vehículos eléctricos, tiempos de llegada aleatorios y estados iniciales de carga aleatorios, que no afectan el rendimiento de la metodología propuesta al evaluarse en diferentes condiciones o datos. Además, es importante mencionar que, con la disponibilidad de datos del mundo real, podrían obtener resultados más precisos y prácticos en comparación con los datos simulados. Por lo tanto, la metodología propuesta se evaluó utilizando datos simulados y no tuvo en cuenta escenarios como la interconexión de vehículos con la red y la integración de fuentes de energía distribuida, que se considerarán en trabajos futuros.

METODOLOGIA

Esta investigación es de tipo cuantitativa debido a que las variables serán de tipo causal comparativa y se centra en la recopilación de datos de las siguientes variables:

Tabla 2 Variables a medir en la investigación

Nombre	Variable	Unidad de medida
Distorsión armónica total de tensión	THD _v	%
Distorsión armónica total de Corriente	THDi o TDD	
Distorsión armónica individual de tensión	IHD _v	
Distorsión armónica individual de corriente	IHDi	

Estas variables serán arrojadas por una simulación con el fin de analizar compararlas con las variables de la norma (Committee of the IEEE Power & Society, 2014). Lo anterior con el fin de explicar posibles efectos en la calidad de la potencia eléctrica en la red de media tensión (Chymera et al., 2006). Para ellos se plantea la siguiente metodología:

Obj. 1. Identificar la topología eléctrica de una estación de carga para vehículos eléctricos por medio de revisión bibliográfica para conocer los elementos que componen los circuitos eléctricos

Se Recopiló información de la red de distribución.:

- Se seleccionó un operador de red el cual tenga información técnica disponible.

- Categorizar los niveles de tensión requeridos disponibles en las ciudades para alimentar las estaciones de carga.
- Establecer información técnica referente a la capacidad de corto circuito en corriente o potencia y la relación X/R .
- Designar un porcentaje de distorsión parásita existente en la red.

Caracterizar los datos de una estación de carga para vehículos eléctricos:

- Examinar las variables eléctricas como la tensión, potencias, factor de potencia y corriente de entrada requeridas para el funcionamiento del sistema de carga.
- Determinar la clase de rectificador usado en las estaciones carga.

Determinar la carga eléctrica total de la red en operación nominal:

- Determinar la cantidad de los puntos de recarga en una estación.
- Definir los escenarios de simultaneidad de los puntos de carga en operación.

Obj. 2. Establecer el modelo del sistema eléctrico desde el punto de acople común PCC hasta la estación de carga por medio del software con el fin de simular las variables de distorsión armónica THD y TDD

Seleccionar el software de simulación:

- Identificar los softwares especializados con versión gratuita o estudiante.
- Examinar la disponibilidad de elementos como rectificadores de 6 y 12 pulsos.

- Se examinó la disponibilidad de un módulo para simulación de armónicos.

Se ajustó el modelo

- Se identificó posibles errores de simulación.
- Se realizó pruebas corriendo repetidamente la simulación.
- Se conceptuó los resultados de la simulación final.

Obj. 3. Comparar los valores porcentuales de THD y TDD arrojados por la simulación con los límites del estándar IEEE 519-2014 para identificar posibles alteraciones en la calidad de la potencia eléctrica en el PCC.

Se definieron las variables de THD y TDD total e individual de la norma IEEE 514-2014. Estas fueron las variables de referencia en la distorsión armónica en el sistema eléctrico de los escenarios planteados.

- Se buscó en la norma los límites de las variables THD correspondiente al nivel de tensión y la TDD en de acuerdo con la relación I_{sc}/I_L .

Se compararon los valores de las variables obtenidas en la simulación con los valores de la norma.

- Se concluyó si el sistema cumple o no con los límites de la norma.
- Se analizaron las variables THD y TDD de calidad de la potencia obtenidos en los escenarios planteados.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la recopilación de información de la red de distribución, se identificaron datos históricos de los proyectos realizados en el área de influencia del operador de red Enel Condensa, por tal razón la información técnica será tomada de este operador referente al nivel de tensión disponible, relación X/R y la capacidad de corto circuito (I_{sc}) en el punto de acople común PCC (Enel Colombia, 2014). Por otro lado, se establece una distorsión total de la onda de tensión THDv de 0.3% remanente en el sistema debido a las cargas existentes que inyectan corrientes armónicas en la red. Cabe aclarar que estos datos técnicos son valores típicos y estimados con base a históricos de un PCC en el nivel de tensión estudiado.

Los niveles en media tensión que usualmente se utilizan para alimentar estas cargas eléctricas de tipo no lineal son de 34.5 kV o 11.4 kV (Enel Colombia, 2014). Este análisis se hará en 34.5 kV debido a que este nivel de tensión causa mayor confiabilidad en el servicio ya que tiene menos clientes conectados que puedan sacar el sistema de operación por una falla eléctrica. A continuación, en la tabla 3 se relacionan los parámetros técnicos del PCC

Tabla 3 Parámetros eléctricos en punto de acople común

Parámetros Eléctricos	Valor
Nivel de Tensión [kV]	34.5
Relación X/R	3
Corriente de corto circuito I_{cc} [kA]	15

El punto de recarga se seleccionó con base al mayor consumo eléctrico de carga rápida; esto porque son los sistemas de mayor capacidad, que pueden hacer perturbaciones en la red eléctrica debido a la inyección de corrientes armónicas en mayor magnitud. Ahora bien, se establecen los parámetros eléctricos técnicos de los puntos de carga como lo es el nivel de tensión de alimentación, factor de potencia y corriente de consumo. Estos valores son tomados del fabricante Weg en su catálogo comercial de soluciones (Weg, 2023). Para ello se tomó la ficha técnica del sistema y se extrajeron los siguientes datos necesarios para modelar el sistema:

Tabla 4 Parámetros eléctricos de un punto de recarga para vehículos eléctricos – Línea Station de la marca Weg. (Weg, 2023)

Parámetros eléctricos		Valor
Entrada en AC	Potencia [kW]	150
	Tensión [V]	380
	Factor de potencia %	98
	Eficiencia %	95
	Corriente [A]	316
Salida en DC	Potencia [kW]	150
	Tensión [V]	920
	Corriente [A]	300

La carga eléctrica instantánea será de 1.2 MVA correspondientes a 8 puntos de 150 kVA. El sistema no tendrá factor de simultaneidad debido a que una estación estaría en la capacidad de cargar ocho vehículos al mismo tiempo.

Para realizar la simulación se usará el software etap con licencia para estudiantes; este software cuenta con un elemento de carga para baterías y este integra una librería con una gran variedad de rectificadores de 12 y 6 pulsos para modelar el sistema de carga. Además, cuenta con un módulo exclusivo para análisis de armónicos lo cual permite ver las perturbaciones por contenido de corrientes armónicas en cualquier nodo y graficar los espectros de armónicos y las ondas de tensión y de corriente. Por estas virtudes el software responde a las necesidades proyectadas en este estudio.

El modelo está compuesto por un equivalente de red, el cual contiene los parámetros eléctricos mencionados en la tabla 3, un transformador tipo seco de 1.5 MVA con grupo de conexión D-Y 150° sólidamente puesto a tierra con niveles de tensión de 34.5/0.38 kV el cual alimenta en barraje bus 1 que a su vez alimenta los cargadores de baterías modelados con los parámetros de la tabla 4.

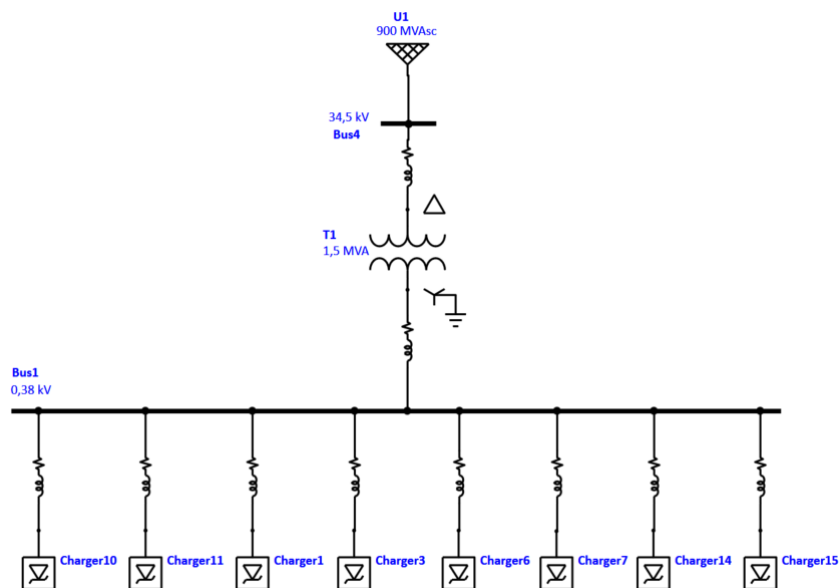


Ilustración 4 Diagrama unifilar del sistema eléctrico

Para el dimensionamiento de los conductores, se tomó la corriente nominal multiplicada por 1.25, luego se seleccionó conductores en cobre con aislamiento al 133% a 90°. Para la conexión entre el PCC y el lado de alta del transformador se incluyó un conductor monopolar Cu MV-90°, calibre 2/0 AWG en configuración de un conductor por fase y para baja tensión un conductor monopolar Cu -90°, calibre 500 kcmil en configuración de tres conductores por fase.

La regulación de tensión debe ser menor al 3% en el barraje 1 de acuerdo con las normas locales. Para ello se estiman unas distancias típicas para una estación de servicio como se muestra en la tabla 5:

Tabla 5 Distancias de alimentación al sistema

Desde	Hasta	Longitud [m]
PCC	Transformador 1.5 MVA	50
Transformador 1.5 MVA	Barraje alimentación de cargadores (Bus 1)	20

Escenario

El escenario contempla una estación de servicio de carga rápida en corriente directa, compuesta por cuatro estaciones de carga y ocho puntos de suministro; cada punto de suministro tendrá una potencia de 150 kW con una corriente de 360 A a 415 V. El cargador se modelará con un rectificador de 12 pulsos marca ABB modelo ACS1000.

Para identificar los valores límites de distorsión armónica de la norma (Committee of the IEEE Power & Society, 2014) que le aplican a este sistema, se procede a realizar unos cálculos previos:

La corriente de consumo de una estación de servicio es de 1867 A; con este dato, se procede a hallar la corriente de corto circuito:

$$I_{sc} = \frac{S_{sc}}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{900}{\sqrt{3} \cdot 34.5} = 15 \text{ kA. } (4)$$

Por último, se halla la relación de la corriente de corto circuito y la corriente de la carga con el fin de clasificar y extraer los valores límites de TDD de la norma (Committee of the IEEE Power & Society, 2014).

Simulación con cargador de baterías integrando un rectificador de 12 pulsos

En la Tabla 6 se muestran los datos arrojados por la simulación de THD individual de tensión y de corriente; así como los límites de la norma (Committee of the IEEE Power & Society, 2014). Como se puede evidenciar, los armónicos de tensión individual se encuentran por debajo de los límites establecidos por la norma. Por otro lado, los armónicos de corriente 11 y 13 como se muestra en la ilustración 7 y la tabla 6, superan los límites de armónicos de corriente individual IDD o THDi en un 65%. De acuerdo con lo anterior, existe una alerta ya que estos armónicos pueden presentar aumento de temperatura en los conductores y en el transformador.

Tabla 6 Porcentajes de distorsión individual de tensión y corriente en PCC, cargadores con rectificador de 12 pulsos

<i>Armónico</i>	<i>SIMULACIÓN IHDv [%]</i>	<i>IEEE 519-2014 IHDv [%]</i>	<i>SIMULACIÓN IHDi [%]</i>	<i>IEEE 519-2014 IDD [%]</i>
5	<i>0.015</i>	3	<i>2.32</i>	4
7	<i>0.012</i>		<i>1.34</i>	
11	<i>0.048</i>		<i>3.3</i>	2
13	<i>0.057</i>		<i>3.3</i>	
17	<i>0.01</i>		<i>0.45</i>	1.5
19	<i>0.007</i>		<i>0.27</i>	
23	<i>0.003</i>		<i>0.09</i>	0.6
25	<i>0.015</i>		<i>0.45</i>	

La distorsión total armónica de tensión se encontró dentro de los límites establecidos en la norma (Committee of the IEEE Power & Society, 2014). Sin embargo, el porcentaje de distorsión total de corriente supera el límite establecido de la norma en un 8.6% como se evidencia en la tabla 7. Por tal razón, estas corrientes armónicas contribuyen en alterar la calidad de la onda de tensión de manera no significativa como se muestra en la ilustración 6.

Tabla 7 Porcentajes de distorsión total de tensión y de corriente en PCC, cargadores con rectificador de 12 pulsos

<i>Armónico</i>	<i>THD_v [%]</i>	<i>IEEE 519-2014 THD_v [%]</i>	<i>THD_i [%]</i>	<i>IEEE 519-2014 TDD [%]</i>
Total	0.077	5	5.43	5

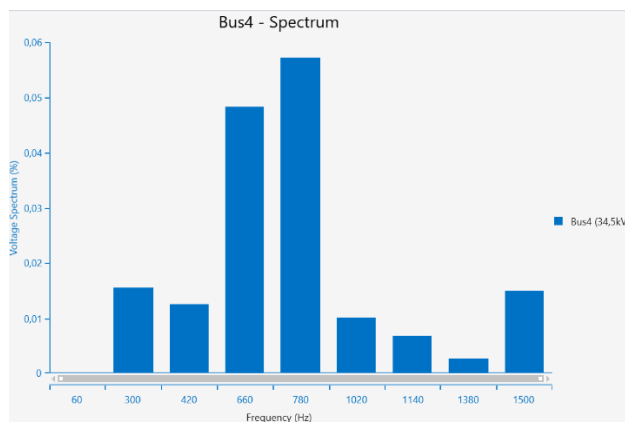


Ilustración 5 Espectro en magnitud de armónicos de tensión - nodo PCC 1.

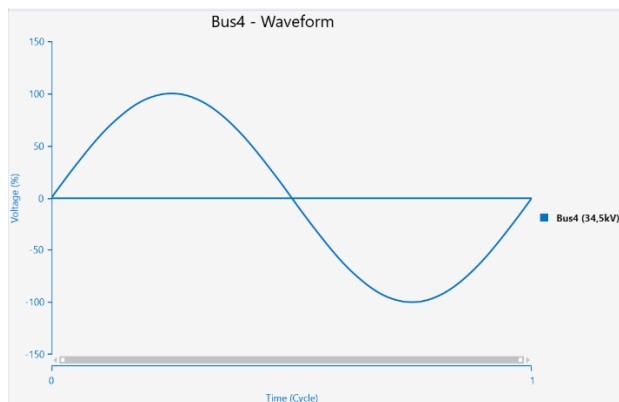


Ilustración 6 Forma de onda de voltaje en el tiempo - nodo PCC 1.

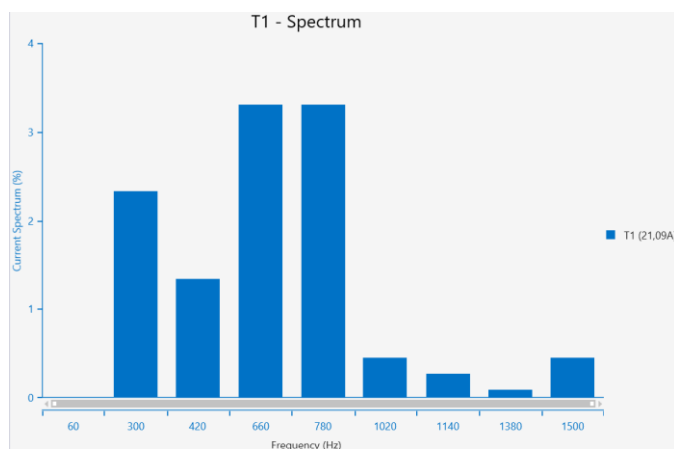


Ilustración 7 Espectro en magnitud de armónicos de corriente - nodo PCC 1.

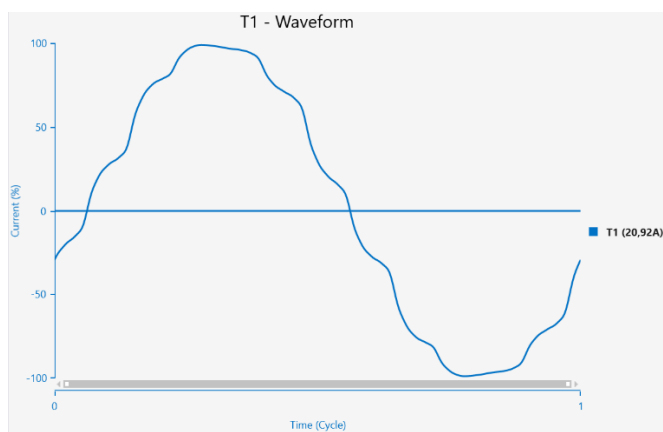


Ilustración 8 Forma de onda de corriente en el tiempo - nodo PCC 1.

Los armónicos de mayor magnitud de corriente son el 11 y el 13, estos corresponden a frecuencias de 660 y 780 Hz respectivamente. Es decir, en el sistema se encuentran corrientes armónicas circulando a estas frecuencias generando una evidente distorsión de la onda de corriente como se muestra en la ilustración 8, para ello es importante identificar posibles resonancias en los elementos pasivos como capacitores, inductancias ó arreglos de estos que estén conectados cerca del PCC, ya que esto puede ocasionar fallas eléctricas por sobrecarga y posterior daño en los aislamientos por aumento en la temperatura en el sistema

CONCLUSIONES

- La topología eléctrica de una estación de carga rápida para vehículos eléctricos consiste en un cargador de baterías que puede integrar un rectificador de 6 o 12 pulsos. Actualmente se utilizan cargadores en AC para carga lenta los cuales requieren un mayor tiempo del vehículo conectado en comparación a un cargador de carga en DC; sin embargo, este último requiere 3 veces mayor potencia de la red de media tensión debido a su gran consumo en un tiempo corto. Cabe anotar que los rectificadores de carga rápida en DC requieren una infraestructura eléctrica más robusta convirtiendo el sistema más costoso en comparación con un cargador de baterías en AC.
- El software etap responde a las necesidades de análisis de armónicos debido a que permite modelar el sistema eléctrico de la red de media tensión con un equivalente de red, nodos y conductores, así mismo, incorpora elementos de

electrónica de potencia como cargadores de baterías que a su vez integra librerías de rectificadores de 6 y 12 pulsos de marcas comerciales como ABB, Rockwell o modelos teóricos de la IEEE. También dispone de módulos para simular la distorsión armónica total e individual de corriente y tensión. Además, permite graficar los espectros de armónicos de tensión y corriente, así como las formas de ondas.

- La distorsión total armónica de tensión en el punto de acople común PCC, incluyendo la carga no lineal de una estación de servicio y la distorsión armónica existente de la red es de 0.377%, este no excede los límites de tensión de la norma (Committee of the IEEE Power & Society, 2014). Por otro lado, las corrientes armónicas que el sistema en cuestión inyecta a la red usando un rectificador de 12 pulsos de la marca ABB modelo ACS1000, evidenciadas por medio de la simulación en el PCC, son los armónicos 11 y 13 correspondientes a las frecuencias 660 y 780 Hz. Estos armónicos de corriente individuales superan los límites de tensión en un 65% y llevan a tener una distorsión total en corriente de 5.43% superando el estándar en un 8.6%; por tal razón, el sistema no cumpliría con la norma (Committee of the IEEE Power & Society, 2014). Estos armónicos de corriente son los que contribuyen en mayor medida a disminuir la calidad de la forma de onda de voltaje como se evidencia en la ilustración 6 aunque la onda de tensión se encuentre dentro de los valores aceptables conforme a la norma.
- El sistema presentaría perturbaciones en la red de media tensión a 34.5 kV y se debe evaluar soluciones de filtros de armónicos activos o pasivos de acuerdo con

la necesidad del sistema. Por último, es necesario evaluar esta distorsión armónica en punto de acople común en niveles de tensión inferiores al del estudiado como 11.4 kV ya que, al tener menor potencia de corto circuito, el sistema se vería afectado en mayor medida.

- La presencia de corrientes armónicas en el sistema como los armónicos 11 y 13 mencionados en el apartado anterior, pueden sobrecargar los conductores de media y baja tensión, así como el transformador que alimenta el sistema de carga. Esto conllevaría a un aumento en la temperatura de operación nominal y podría deteriorar los aislamientos de los elementos eléctricos. Para evaluar el grado de daño en los elementos se propone continuar con una investigación de tipo experimental.

REFERENCIAS

- ABB. (2014). *Guía técnica nº 6 Guía de los armónicos con accionamientos de CA ABB drives*.
- Alberto R, Marcelo A, & Antonio E. (2003). *Modelado de sistemas eléctricos en presencia de armónicos*.
- Carrillo González, C. J. (2003). *Fundamentos del Análisis de Fourier*.
- Chymera, M., Renfrew, A. C., & Barnes, M. (2006). Railway modelling for power quality analysis. *WIT Transactions on the Built Environment*, 88, 797–804.
<https://doi.org/10.2495/CR060781>
- Committee of the IEEE Power, D., & Society, E. (2014). *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems Sponsored by the Transmission and Distribution Committee IEEE Power and Energy Society*.
- Eléctricos, S., Mario, J., Vallejo, R., Hernando, F., & Quintero, O. (n.d.). *Metodologías para identificar fuentes armónicas en universidad tecnológica de pereira facultad de ingenierías eléctrica, electrónica, de física y ciencias de la computación programa de ingeniería eléctrica pereira 2007*.
- Enel Colombia. (2014). *Niveles de tensión de conexión para cargas de clientes niveles de tensión de conexión de cargas de clientes*.
- Fuchs E, & Masoum M. (2008). *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines* .
- Gupta, R. S., Anand, Y., Tyagi, A., & Anand, S. (2023). Sustainable charging station allocation in the distribution system for electric vehicles considering technical, economic, and societal factors. *Journal of Energy Storage*, 73. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109052>

- Hernandez, D. (n.d.). INCIDENCIA DE LOS ARMÓNICOS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA CAUSADA POR LA INCLUSIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS. 2018.
- Mendoza, & Rolando. (2015). *Corrientes inyectadas por un rectificador* .
- Moses V, Chakraborty P, & Pal M. (2023). *Planning of fast charging infrastructure for electric vehicles in a distribution system and prediction of dynamic price*.
- Rajs, V., Rašević, N. L., Bodić, M. Z., Zuković, M. M., & Babković, K. B. (2022). PID Controller Design for Motor Speed Regulation with Linear and Non-Linear Load. *IFAC-PapersOnLine*, 55(4), 225–229. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.06.037>
- Shimi, S., Letha, S., & Bollen, M. (2021). *Impact of Electric Vehicle Charging on The Power Grid*.
- Weg. (2023). *Estaciones de Recarga para Vehículos Eléctricos ® Motores Industriales Motores Comerciales y Appliance Automatización*. www.weg.net