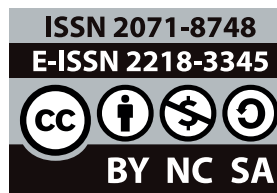


Solución a problemas de calidad de energía en distribución, enfocada en huecos de tensión

Solution to Power Quality Issues in Distribution, Focused on Voltage Sags



Samuel Odín Calderón Barrera¹

David Javier Barrios Cruz²

Recibido: 6 de mayo de 2025

Aprobado: 29 de junio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.5377/entorno.v1i80.21035>

URI: <https://hdl.handle.net/11298/1400>

Resumen

El estudio abordó la solución a problemas de calidad de energía en sistemas de distribución eléctrica, centrándose en huecos de tensión. Se realizaron mediciones en dos empresas industriales, denominadas “cartonera” y “embotelladora”. Los datos recopilados revelaron eventos frecuentes de caídas de tensión. Para su análisis, se desarrolló un script en Python que generó resúmenes y gráficos precisos sobre regulación de tensión, distorsión armónica, flicker y huecos de tensión. Con base en los resultados, se propuso comparar los datos obtenidos contra un edificio de servicios corporativos, que cuenta con un mitigador instalado de huecos de tensión (SagFighter). La implementación del SagFighter demostró una reducción significativa de

Abstract

This study addresses power quality issues in electrical distribution systems, focusing on voltage sags. Measurements were conducted at two industrial facilities, referred to as “cardboard factory” and “bottling plant,” revealing frequent voltage dip events. A Python script was developed to generate accurate summaries and visualizations of voltage regulation, harmonic distortion, flicker, and voltage sags. The results were compared with data from a corporate services building equipped with a voltage sag mitigator (SagFighter). The SagFighter demonstrated significant reduction in voltage sags, indicating high effectiveness for industrial systems. The analyses confirmed the feasibility of the proposed solution, therefore enhancing network

¹ Universidad de El Salvador. cb19021@ues.edu.sv. <https://orcid.org/0009-0009-2285-1563>

² Universidad de El Salvador. david.berrios@ues.edu.sv. <https://orcid.org/0009-0003-4272-4744>

los huecos de tensión, demostrando alta efectividad en sistemas industriales. Los análisis confirmaron la viabilidad de la solución, mejorando la estabilidad de las redes. En conclusión, la solución propuesta de utilizar un mitigador de huecos de tensión ofrece un enfoque eficiente para mitigar huecos de tensión en las instalaciones de las industrias.

Palabras clave:

El Salvador-Distribución de energía eléctrica, Electricidad-Aparatos e instrumentos-protección, Energía eléctrica-Calidad, Consumo de energía eléctrica, Reguladores de voltaje, Armónicos (ondas eléctricas)

stability. The use of a voltage sag mitigator is concluded to be an efficient approach for mitigating voltage sags in industrial facilities.

Keywords:

El Salvador-Power distribution, Power- Electronic instruments and devices-protection, Energía eléctrica-Calidad, Power consumption, Voltage regulators, Harmonics (electric waveforms)

1. Introducción

La calidad de la energía eléctrica es fundamental para garantizar la continuidad operativa en sistemas industriales. Los huecos de tensión, definidos como caídas temporales del voltaje entre 0.1 y 0.9 pu con duración de 8.3 a 500 ms en 60 Hz (Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE], 2019), representan una de las perturbaciones más críticas, causando paradas inesperadas, daños a equipos sensibles y pérdidas económicas significativas. Este estudio se basa en un análisis exhaustivo realizado en una empresa cartonera y una embotelladora en El Salvador durante seis meses, utilizando analizadores de calidad de energía para caracterizar estos eventos y proponer el SagFighter como solución para la mitigación de huecos de tensión tras evaluar su desempeño en un edificio corporativo.

2. Marco teórico

2.1 Evolución de la Calidad de Energía

Históricamente, los problemas de calidad de energía se limitaban a centrales eléctricas, donde fluctuaciones de voltaje afectaban las calderas termoeléctricas (Baggini, 2008). Con la modernización de las redes,

la interconexión de sistemas y el uso masivo de equipos electrónicos sensibles (microprocesadores, variadores de velocidad, etc.), las perturbaciones han aumentado. Factores como condiciones climáticas, fallas en líneas y cargas no lineales han elevado la necesidad de monitoreo continuo y soluciones específicas, reguladas por estándares como IEEE 1159 e IEC 61000-4-30.

2.2 Problemas de Calidad de Energía

Los sistemas de distribución enfrentan diversas perturbaciones que afectan la estabilidad del suministro.

2.2.1 Interrupciones

Clasificadas por la Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones (SIGET) como momentáneas (menores o iguales a 3 minutos) o sostenidas [mayores a 3 minutos] (SIGET, 2014), las interrupciones resultan de fallas tanto en alimentadores o reclosers automáticos como en distintos puntos de la red, dando como resultado la ausencia de tensión.

Las interrupciones suelen ser causadas por una serie de eventos en la red eléctrica. Entre las causas más comunes se encuentran:

- **Fallas en la red eléctrica**, que pueden derivarse de cortocircuitos, sobrecargas inesperadas, bajas frecuencias en el sistema eléctrico.
- **Contacto con animales**, como aves o roedores, que pueden generar fallas al tocar líneas o equipos eléctricos.
- **Caídas de árboles en las líneas**, especialmente en temporadas de tormentas o vientos fuertes.
- **Descargas atmosféricas**, que pueden inducir sobrevoltajes y provocar disparos de los sistemas de protección.
- **Fallas en los equipos de sistemas de potencia**, debido al envejecimiento o mal mantenimiento de los dispositivos.
- **Mal funcionamiento del control**, donde los sistemas automatizados no operan adecuadamente ante ciertas condiciones de la red.

2.2.2 Sobrevoltajes

Un sobrevoltaje es un incremento en el voltaje RMS mayor al 110 % a la frecuencia nominal por una duración mayor a un minuto (Dugan et al., 2012).

Los sobrevoltajes, incrementos transitorios de hasta 2-3 p.u., provienen de descargas atmosféricas o conmutación de capacitores. En sistemas de 13.2-34.5 kV, dañan aislamientos y componentes electrónicos si exceden 1.5 pu por más de 1 ms. En El Salvador, su frecuencia aumenta en temporada lluviosa, requiriendo supresores o pararrayos para mitigar impactos en transformadores y cargas sensibles.

Un sobrevoltaje puede existir cuando el sistema eléctrico carece de la capacidad suficiente para la regulación de voltaje deseada o hay una configuración de tap incorrecta en los transformadores (Dugan et al., 2012).

2.2.3 Desbalance de voltaje o corriente

El desbalance de voltaje y corriente es otro fenómeno que puede afectar la calidad de la energía suministrada. Según lo expresado en (Baggini, 2008),

este fenómeno se manifiesta cuando las tensiones de fase no son iguales en magnitud o no están desfasadas correctamente en un sistema trifásico. La variación de voltaje de corta duración incluye desviaciones RMS en frecuencias de energía para más de un minuto, mientras que las variaciones de voltaje de larga duración pueden ser sobrevoltajes (overvoltage) o bajas de tensión (undervoltage).

El desbalance de voltaje también se define como la desviación máxima del promedio de voltajes o corrientes trifásicas, dividida por el promedio de los voltajes o corrientes trifásicas, expresadas en porcentaje.

Generalmente, estas variaciones de voltaje no son el resultado de fallas o interrupciones en la red de distribución, sino que están relacionadas con variaciones de carga en la red. Este fenómeno se conoce como regulación de voltaje, y es un parámetro crítico en la operación de los sistemas eléctricos, ya que influye directamente en el rendimiento de los equipos conectados.

Impacto del desbalance de corriente y tensión en los equipos eléctricos

Todos los equipos eléctricos están diseñados para operar de manera óptima dentro de un rango específico de voltaje. Por lo general, este rango se define con una tolerancia del ± 10 % del voltaje nominal, ya que se considera que ciertas fluctuaciones en la tensión son inevitables debido a la conexión y desconexión de dispositivos en la red. Sin embargo, cuando la variación de voltaje excede estos límites, pueden presentarse efectos adversos como:

- Sobrecalentamiento de motores eléctricos y otros equipos sensibles.
- Disminución en la eficiencia energética, aumentando el consumo de energía sin una mejora en el rendimiento.
- Daños permanentes en dispositivos electrónicos sensibles a variaciones de voltaje.
- Fallas prematuras en lámparas, transformadores y otros dispositivos eléctricos.

2.2.4 Distorsión Armónica

Los equipos electrónicos y el uso de cargas no lineales provocan una distorsión en la tensión y la corriente (Barcón et al., 2012). En un sistema ideal, la corriente y el voltaje deberían tener una forma de onda senoidal perfecta a la frecuencia fundamental (60 Hz en El Salvador). Sin embargo, en la realidad, las señales de corriente y voltaje pueden verse como una superposición de señales de diferentes frecuencias, conocidas como armónicas.

Las armónicas son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental y pueden distorsionar la forma de onda original, generando impactos negativos en la red y en los equipos conectados.

Existen cuatro principales categorías de dispositivos que generan armónicas:

- Dispositivos ferromagnéticos, como transformadores, motores y generadores.
- Convertidores estáticos de potencia, como variadores de velocidad, rectificadores e inversores.
- Dispositivos que funcionan con arco eléctrico, como hornos de arco y soldadoras eléctricas.
- Convertidores DC/AC de sistemas de generación distribuida.

La presencia de armónicas en la red puede generar problemas como sobrecalentamiento en equipos (sobre todo en transformadores con esquema en Delta, donde se queda circulando una corriente en la tercera armónica), resonancias en la red, reducción en la eficiencia de los transformadores y afectación en equipos electrónicos sensibles.

2.2.5 Flicker

El término flicker se usa para referirse a la impresión subjetiva experimentada por los seres humanos cuando son sujetos a cambios ocurridos en la intensidad

lumínica de las fuentes de luz (Baggini, 2008). Estas fluctuaciones generalmente se deben a la conexión de cargas cíclicas como hornos eléctricos o variadores de velocidad.

2.2.6 Medición del Flicker

Para evaluar la severidad del flicker, se utilizan dos indicadores principales:

- Pst (corto plazo, cada 10 min): Se calcula como la raíz cúbica del promedio de los cubos de los valores momentáneos del flicker durante un intervalo de 10 minutos.
- Plt (largo plazo, 2 horas): Se obtiene promediando 12 valores Pst consecutivos, representando un intervalo de 2 horas.

Según la IEC, la intensidad de las fluctuaciones no debe exceder un valor de $Pst = 1.0$ durante el 95 % de una semana. Este valor se ha determinado de manera subjetiva, basándose en estudios en los que el 50 % de las personas apenas notan cambios en la intensidad luminosa cuando el Pst es igual a 1.0.

2.2.7 Huecos de Tensión

Los huecos de tensión representan uno de los problemas más recurrentes dentro del ámbito de la calidad de energía. Estos eventos ocurren con frecuencia en los sistemas de distribución eléctrica y pueden generar impactos significativos en el desempeño de equipos sensibles y procesos industriales.

El hueco de tensión es una caída de voltaje que puede durar desde la mitad de un ciclo hasta varios segundos, típicamente hasta un minuto (Martínez Basulto y Torrico de la Reza, 2023). Estos eventos pueden ser causados por una variedad de factores, entre ellos fallas en los sistemas de potencia, maniobras de transferencia de carga, seccionamiento para aislar puntos de falla en la red, arranque de motores de gran tamaño y operación de cargas no lineales.

Caracterización de los Huecos de Tensión

Un hueco de tensión se caracteriza por un decremento en el voltaje RMS que oscila entre el 0.1 pu y el 0.9 pu de la tensión nominal (IEEE, 2019). La magnitud del hueco de tensión se mide como la tensión remanente y no como la caída en sí. Por ejemplo, un hueco del 30 % significa que el voltaje retenido es del 70 % de su valor nominal.

Es importante diferenciar los huecos de tensión de otros eventos de calidad de energía, como las interrupciones momentáneas o sostenidas. Mientras que un hueco de tensión implica una reducción parcial del voltaje por un tiempo breve, una interrupción momentánea ocurre cuando el voltaje cae por debajo del 10 % de su valor nominal (menos de 0.1 pu) por un tiempo menor a un minuto. En contraste, una interrupción sostenida se da cuando la pérdida de tensión dura más de un minuto y generalmente requiere intervención manual o automática para su restauración.

Impacto de los huecos de tensión en diferentes sectores productivos

A medida que la calidad de energía ha cobrado mayor relevancia, clientes industriales y comerciales han mostrado un creciente interés en minimizar los efectos adversos de los huecos de tensión. Las cargas sensibles, como sistemas de automatización, instrumentación médica, telecomunicaciones y equipos informáticos, pueden experimentar fallos de operación debido a estos eventos. En entornos industriales, una reducción breve en la tensión puede causar paradas de líneas de producción, errores en sistemas de control y pérdidas de información en sistemas basados en computadoras.

Por ejemplo, en la industria manufacturera, si una línea de producción automatizada sufre un hueco de tensión, los motores, variadores de velocidad y otros dispositivos electrónicos pueden detenerse abruptamente, lo que obliga a realizar reinicios manuales y genera pérdidas de productividad. En la industria de semiconductores, donde los procesos requieren alta estabilidad en

el suministro eléctrico, un hueco de tensión puede afectar la calidad del producto final, ocasionando lotes defectuosos y desperdicio de materiales.

En hospitales y centros de investigación, la presencia de huecos de tensión puede comprometer el funcionamiento de equipos de diagnóstico por imagen, sistemas de soporte vital y laboratorios, generando riesgos críticos para la atención médica.

2.2.8 Mitigación de Huecos de Tensión

Las soluciones incluyen Compensadores Estáticos de VAR (SVC) para regular potencia reactiva, sistemas UPS para respaldo durante caídas, y mitigadores de huecos de tensión específicos como el SagFighter, que ajusta el voltaje de salida en tiempo real mediante un transformador de corrección, ideal para proteger cargas críticas.

3. Metodología

El estudio se desarrolló en tres etapas: acceso a analizadores de energía instalados en clientes industriales, recolección de datos y análisis automatizado. Se seleccionaron dos empresas industriales representativas: una cartonera (23 kV L-L, alta demanda por maquinaria pesada) y una embotelladora (46 kV L-L, procesos continuos), ambas conectadas a redes de distribución típicas de El Salvador. También se midió la calidad de energía, enfocándose en los huecos de tensión, en un edificio de servicios corporativos, el cual contaba con un SagFighter en sus instalaciones. El período de monitoreo, de julio a diciembre de 2024, cubrió condiciones estacionales extremas (lluvias intensas en julio, estabilidad en diciembre), asegurando un análisis robusto.

Se hizo uso de analizadores Powerside PQube 3 instalados en los puntos de acople común, configurados para registrar tensión RMS, VTHD, ITHD, flicker (Pst), huecos de tensión y otros cada 10 minutos. En el edificio corporativo (23 kV), se midió la entrada y salida del SagFighter para evaluar su desempeño, instalándolo en paralelo con las cargas críticas.

La recolección generó más de 25.000 registros por empresa (aproximadamente 4.320 horas de datos), exportados en formato CSV desde el software PQube 3. Para procesarlos, se desarrolló un código en Python que automatizó el análisis:

- Preprocesamiento: Se usaron bibliotecas como Pandas para limpiar datos (eliminar valores nulos) y NumPy para cálculos estadísticos (promedios, percentiles).
- Clasificación de Huecos: Un algoritmo identificó eventos según IEEE 1159 (magnitud 0.1-0.9 pu, duración 0.5-30 ciclos) y los clasificó como críticos (fuera de la curva ITIC) o no críticos.
- Cumplimiento SIGET: Se compararon parámetros con límites locales (tensión $\pm 6\%$, VTHD $< 8\%$, ITHD $< 20\%$, Pst < 1.0), generando reportes mensuales.
- Visualización: La librería matplotlib se utilizó para crear las gráficas de tensión RMS, curvas ITIC y tendencias de flicker, facilitando la identificación de patrones (ej., picos en julio).

El código redujo el tiempo de análisis, procesando datos en lotes y generando estadísticas detalladas (ej., 1.123 huecos en la empresa cartonera, 222 en la empresa embotelladora).

4. Resultados y discusión

4.1 Normativa de Calidad de Servicio (SIGET)

La SIGET (2014) regula la calidad del servicio en El Salvador mediante el Acuerdo No. 38-E-2015.

Establece límites como:

- Tensión RMS dentro de rangos de límites inferiores y superiores según el nivel de tensión y la densidad de carga. Para los casos estudiados, debido a que son empresas que se encuentran

en una zona urbana (por su densidad de carga) y son clientes de media tensión, esta no debe ser mayor o menor al 6 % de su tensión nominal.

- La cantidad de registros fuera del límite no debe exceder el 5 %.
- Tasa de distorsión armónica de voltaje o VTHD, la cual debe ser $\leq 8\%$.
- Tasa de distorsión armónica de corriente o ITHD, la cual debe ser $\leq 20\%$.
 - Tanto para la tasa de distorsión armónica de voltaje como la de corriente, los registros fuera del límite no deben exceder el 5 %.
- Nivel de flicker. Respecto al nivel de flicker, la SIGET dicta que debemos basarnos en lo establecido por la IEC 61000-4-15, cuyo nivel debe estar por debajo de 1.0 en el 95 % de la semana.

Este marco, combinado con IEEE 1159 e IEC 61000-4-30, permitió un análisis riguroso de los datos recopilados, enfocándose en huecos de tensión como el problema predominante (aunque esta problemática no está contemplada en el Acuerdo No. 38-E-2015).

4.2 Análisis de Calidad de Energía

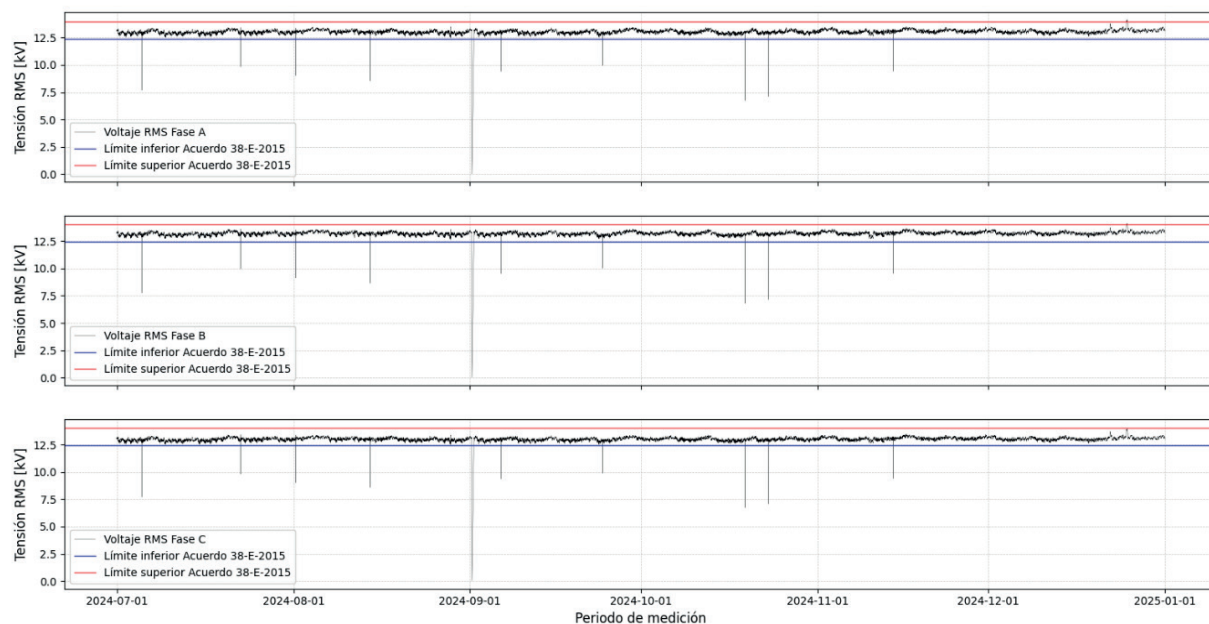
El análisis abarcó múltiples parámetros para caracterizar la calidad del suministro, procesados con el código en Python y visualizados en gráficos.

4.3 Perfiles de Tensión

Se evaluó la tensión RMS en las tres fases para verificar cumplimiento con el límite SIGET de $\pm 6\%$ (12.41-13.99 kV L-N en cartonera; 24.96-28.15 kV L-N en embotelladora). En la cartonera, el promedio fue 13.07 kV, con caídas súbitas por interrupciones momentáneas; en la embotelladora, 26.49 kV mostró estabilidad, salvo una caída sostenida (2/11/2024).

Figura 1

Perfil de tensión RMS en las tres fases de la cartonera.

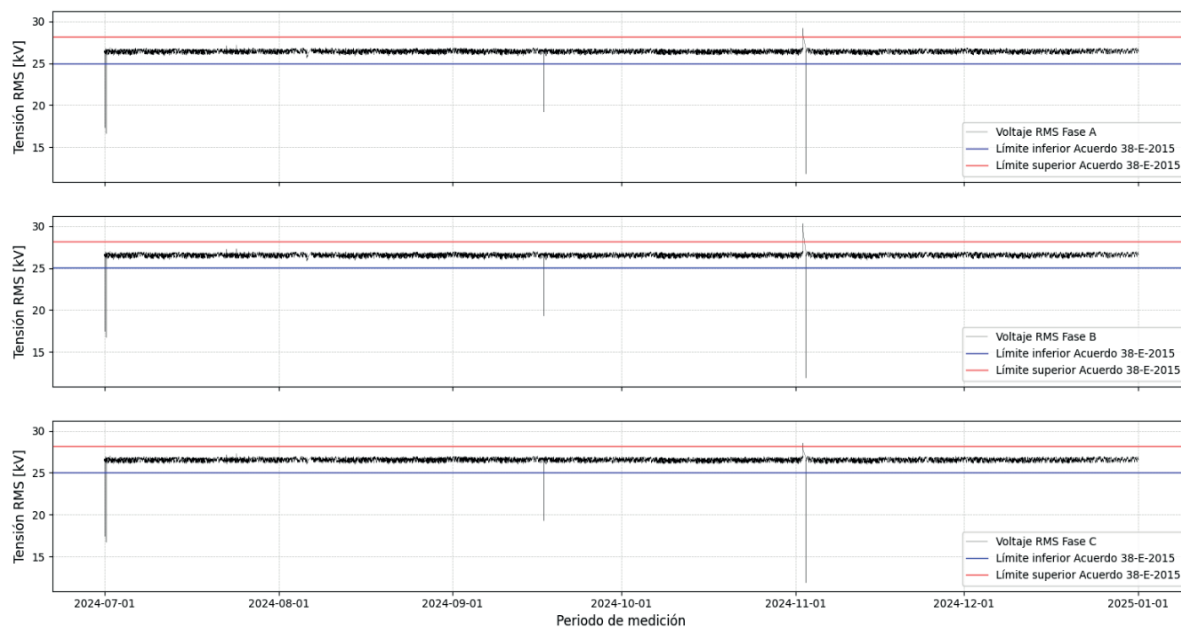


Se evidencia en la Figura 1 que el circuito al que está conectada la cartonera se encuentra regulado de forma automática por el transformador de potencia de la

subestación, estando dentro de los límites establecidos según la Normativa de Calidad del Servicio (SIGET, 2014).

Figura 2

Perfil de tensión RMS en las tres fases de la embotelladora.



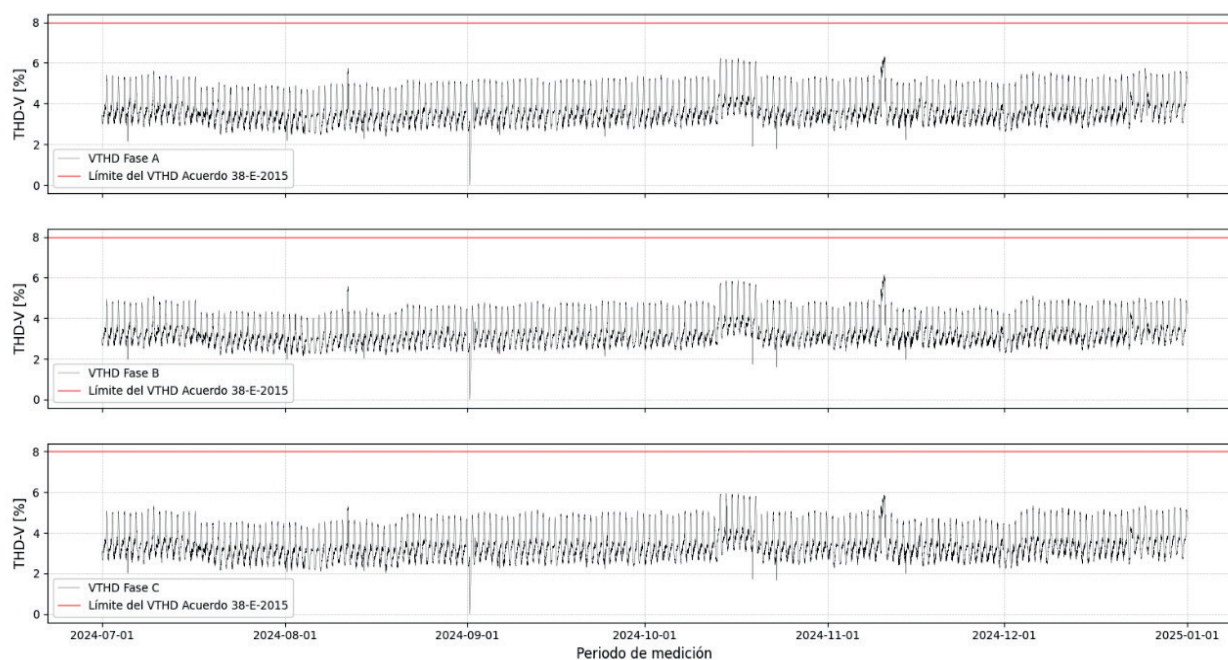
Se puede observar en el perfil de tensión que el circuito al que está conectado la empresa embotelladora se encuentra regulado de forma automática por el cambiador de tomas bajo carga del transformador de potencia de la subestación a la que está conectada, estando dentro de los límites establecidos según la Normativa de Calidad del Servicio (SIGET, 2014).

4.4 Tasa de Distorsión Armónica de Tensión (VTHD)

La VTHD midió la distorsión de la onda de voltaje (< 8 % por la SIGET). En la cartonera, el promedio fue 3,48 %, con un 2,3 % de registros entre 5 % y 8 % en julio, ligado a cargas no lineales externas. En la embotelladora, 1,56 % indicó mayor estabilidad, con valores máximos de 3,2 %. Histogramas mostraron concentraciones bajas, pero colas derechas en la cartonera reflejaron eventos armónicos significativos.

Figura 3

Tasa de Distorsión Armónica de Voltaje (THDV) de la cartonera.



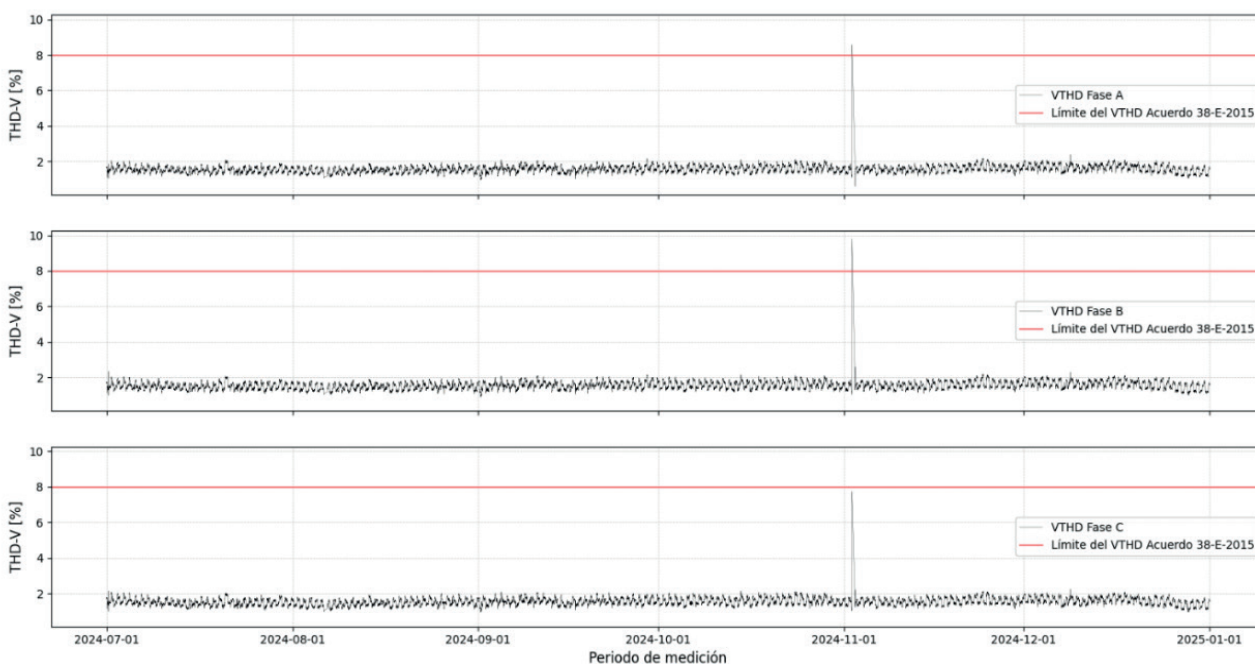
Se observa en la figura que la tasa de distorsión armónica total de voltaje está dentro del rango admisible establecido por la SIGET (2014), pero contiene valores elevados respecto al límite máximo.

Debido a que este se encuentra por debajo del límite, se concluye que en el punto de entrega al cliente

cumple con lo establecido en la normativa, estando por debajo del 8 %. Gracias a que la tasa de distorsión armónica de tensión se encuentra dentro del límite, garantiza el suministro de la energía eléctrica con una forma de onda de tensión sinusoidal con poco contenido armónico.

Figura 4.

Tasa de Distorsión Armónica de Voltaje (THDV) de la embotelladora.



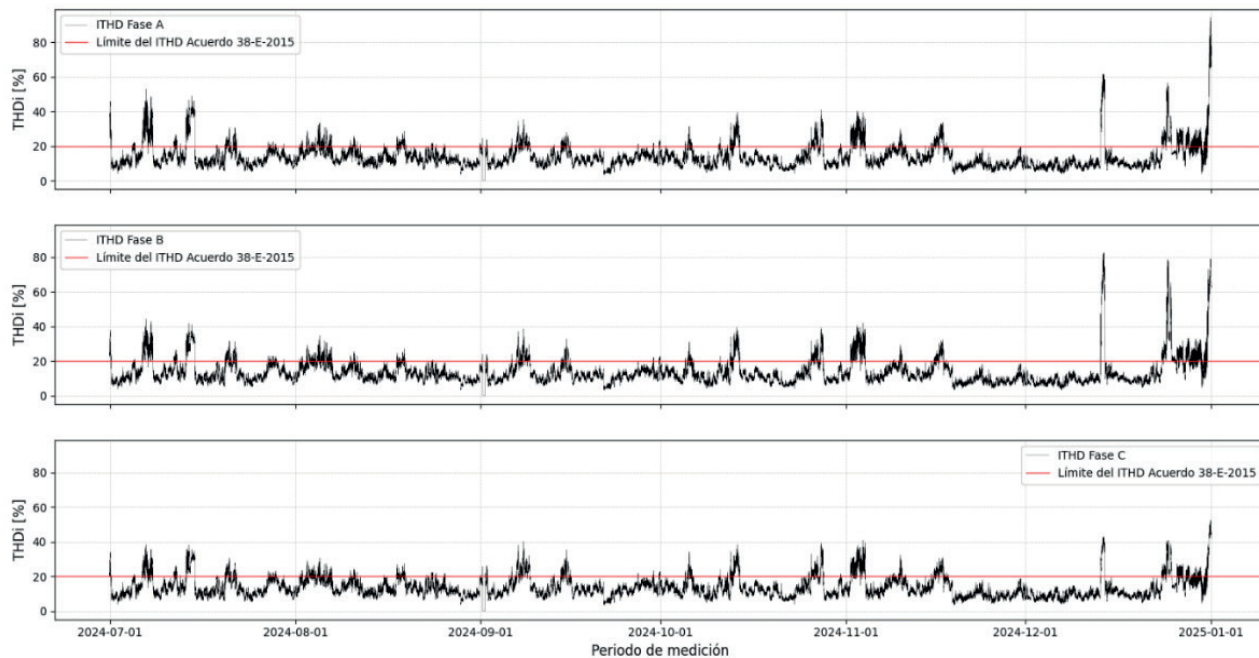
Se observa en la figura que la tasa de distorsión armónica total de voltaje está dentro del rango admisible establecido por la SIGET (2014). Debido a que este se encuentra muy por debajo del límite, se concluye que en el punto de entrega al cliente cumple con lo establecido en la normativa, estando por debajo del 8 %. Gracias a que la tasa de distorsión armónica de tensión se encuentra dentro del límite y está alejada del límite del 8 %, garantiza el suministro de la energía eléctrica con una forma de onda de tensión altamente sinusoidal y bajo contenido armónico.

Tasa de Distorsión Armónica de Corriente (ITHD)

La ITHD (< 20 % por la SIGET) evaluó la inyección de armónicos por cargas internas. La cartonera registró 13,86 % promedio (13,71 % fuera de límite). En la embotelladora, el 10,23 % (1,76 % fuera de límite) mostró menor impacto. Histogramas evidenciaron distribuciones sesgadas, destacando la necesidad de filtros armónicos en la cartonera.

Figura 5.

Tasa de Distorsión de Corriente (ITHD) en la cartonera.

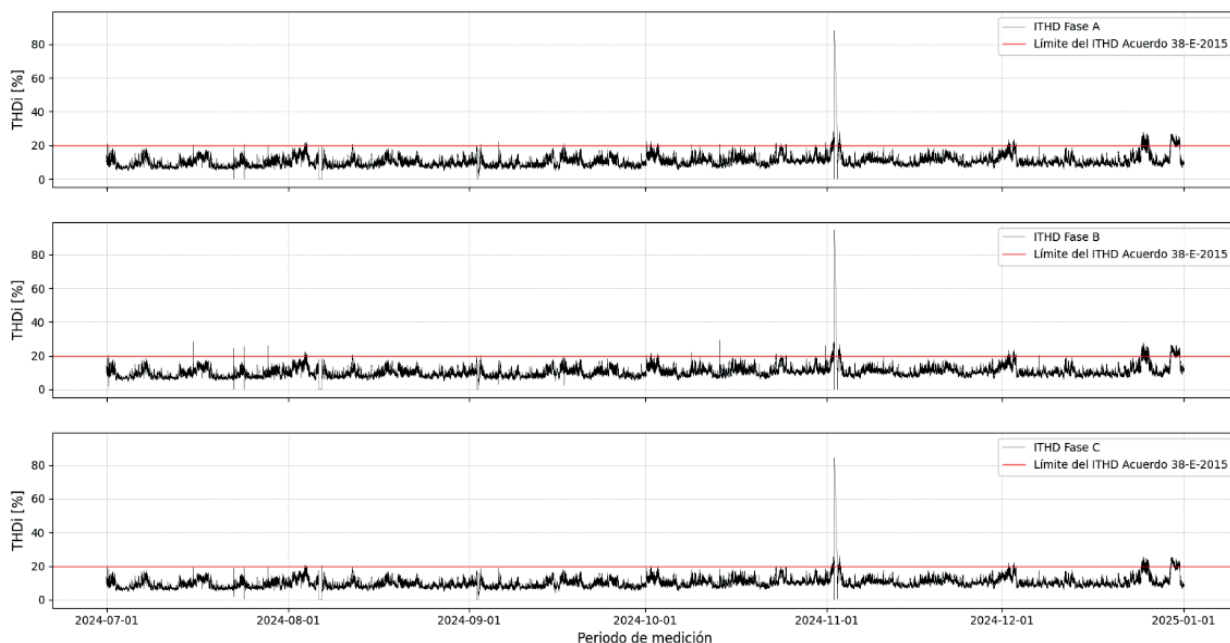


Se puede observar en la figura que una gran cantidad de registros correspondientes a la cartonera se encuentran fuera de los límites. Esto se traduce en una mala calidad de la onda sinusoidal de corriente. Debido a que la tasa de registros excede

el 5 % establecido en la normativa, se puede inferir que esta empresa puede estar ocasionando perturbaciones en la red, inyectando armónicas a la red, perturbando a los usuarios conectados al circuito.

Figura 6.

Tasa de Distorsión de Corriente (ITHD) en la embotelladora.



Se observa que, a diferencia de la cartonera, tenemos una tasa de distorsión armónica de corriente más estable. Esto indica que, la calidad de la onda de corriente, a pesar de siempre tener cierta distorsión por las armónicas, logra mantener una forma mucho más estable que la forma de onda de la cartonera.

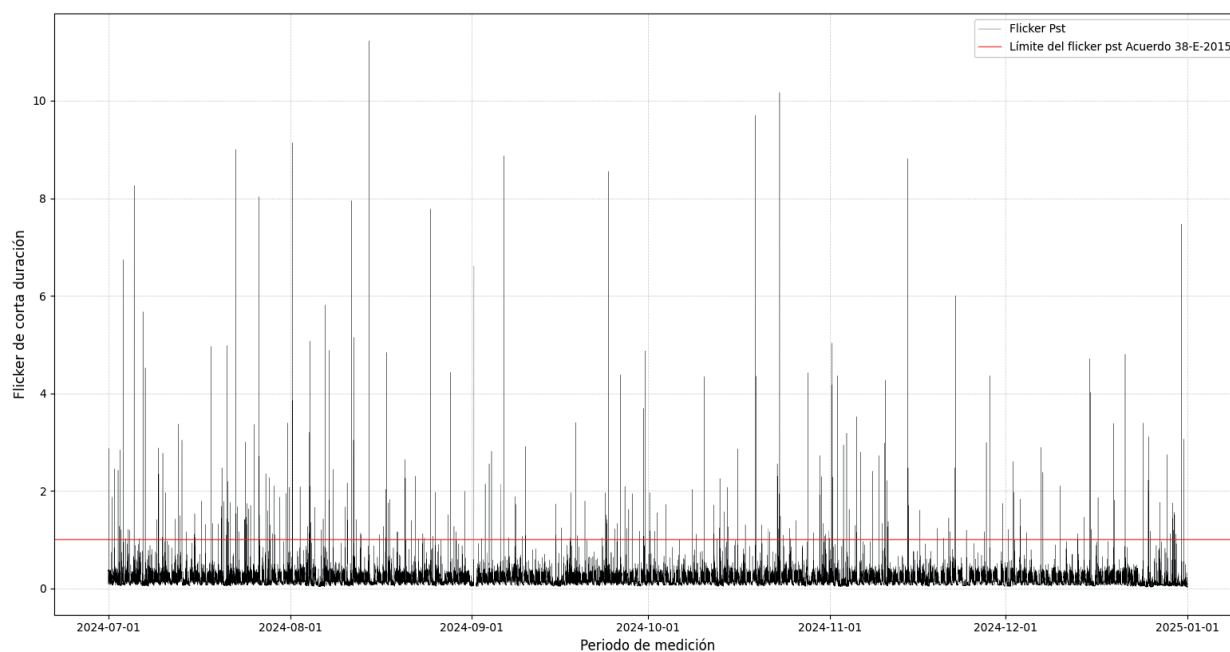
4.6 Flicker

El flicker ($P_{st} < 1.0$) promedió 0.21 en la cartonera (percentil 95: 0.41) y 0.22 en la embotelladora (percentil 95: 0.43), dentro de límites. Los histogramas mostraron distribuciones ajustadas, con colas leves por cargas variables.

El nivel de flicker de la cartonera, que es transmitido por las redes de distribución, alcanzó el punto de acople común de la cartonera (o PCC, por sus siglas en inglés), teniendo un valor promedio de 0.21. Respecto a la mediana y la moda, tenemos valores de 0.15 y 0.07. Calculando el percentil 95 del total de registros en el periodo de medición, se alcanzó un valor de 0.41, significando que el 95 % de los datos en el periodo de medición se encuentran por debajo del valor calculado, estando dentro del límite de 1.0, establecido por la SIGET (2014).

Figura 7

Flicker de Corta Duración (Pst) en la cartonera.

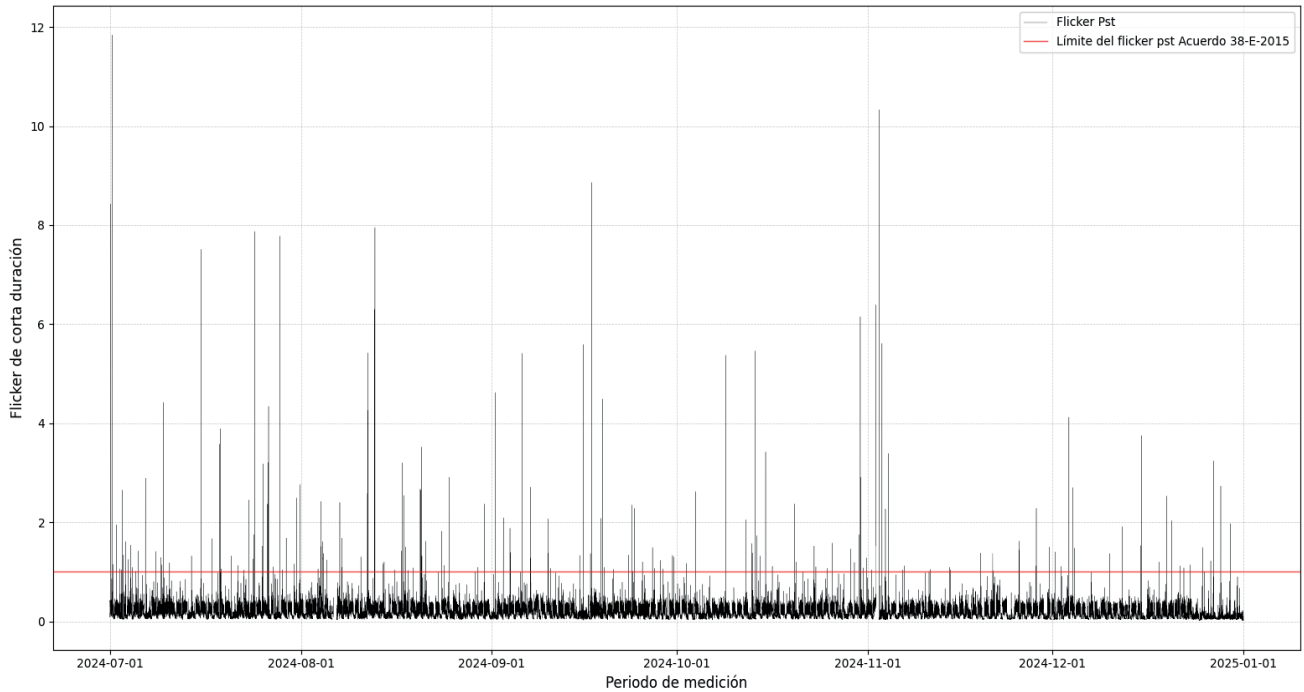


El nivel de flicker que es transmitido por las redes de distribución alcanzó el punto de acople común de la embotelladora (o PCC, por sus siglas en inglés), teniendo un valor promedio de 0.22. Tenemos valores de mediana y moda de 0.17 y 0.05, respectivamente.

Calculando el percentil 95 del total de registros en el periodo de medición, alcanzó un valor de 0.43, significando que el 95 % de los datos en el periodo de medición se encuentran por debajo del valor calculado, estando dentro del límite de 1.0, establecido por la SIGET (2014).

Figura 8

Flicker de Corta Duración (Pst) en la embotelladora.



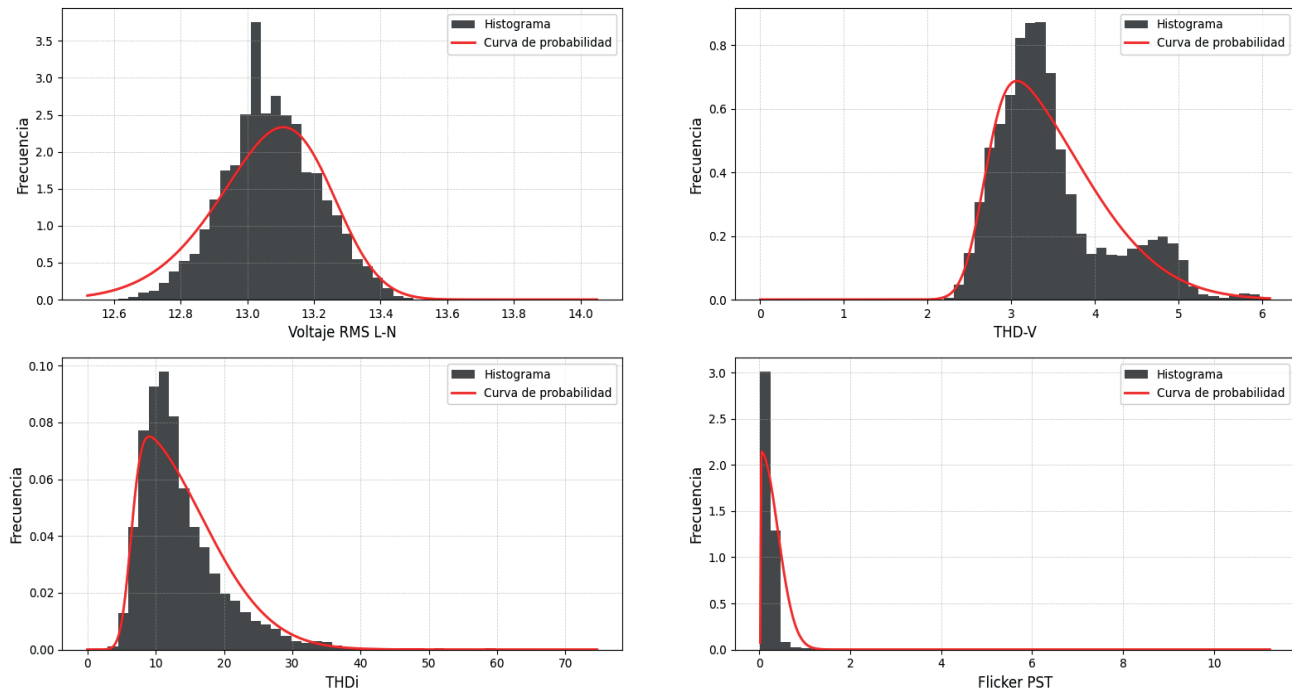
4.7 Análisis de la curva de probabilidad

Como se observa en los histogramas, para la cartonera, se tiene una distribución normal centrada únicamente para la tensión RMS, significando que la

mayoría de los valores se encontrarán alrededor de la media aritmética. Al analizar la mediana, la moda y la media del flicker y las tasas de distorsión armónica de voltaje y corriente, se tiene un sesgo positivo, indicando la existencia de valores atípicos elevados.

Figura 9.

Histogramas y curvas de probabilidad correspondientes al voltaje RMS, THDV, THDi y flicker Pst de la empresa cartonera.

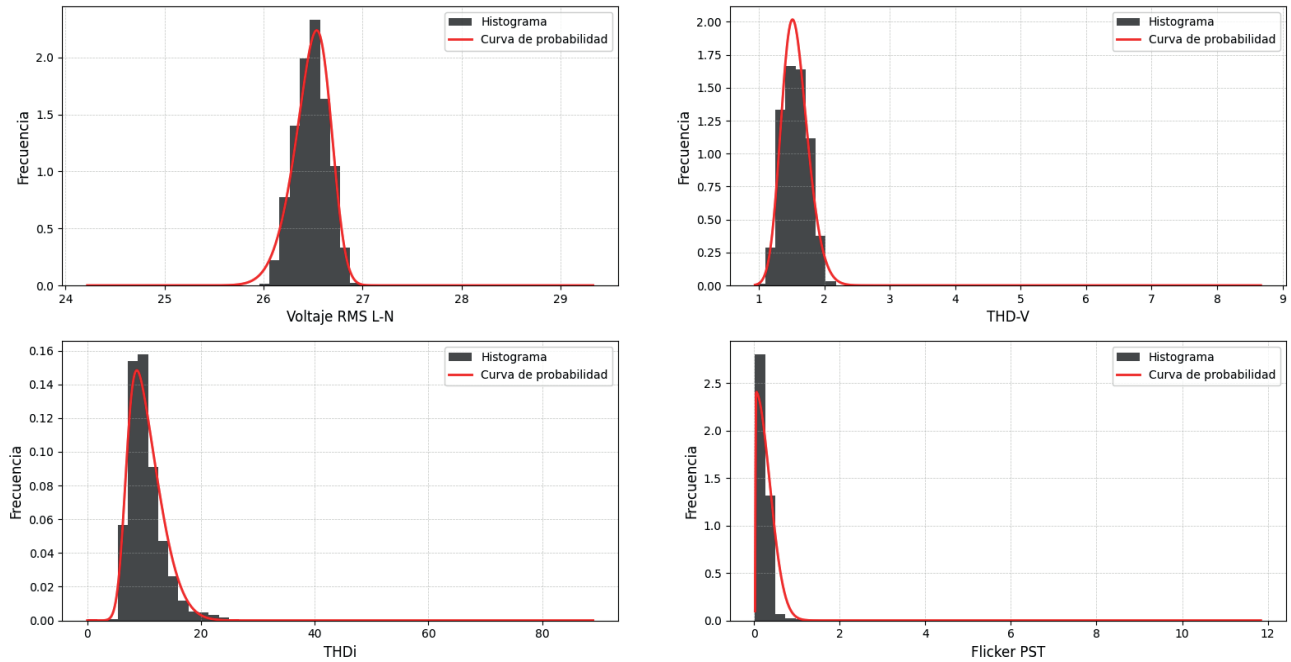


Como se observan en los histogramas, para la embotelladora, se tiene una distribución normal centrada para la tensión RMS y la tasa de distorsión armónica de voltaje. Esto indica que la mayoría de los valores de esta medición se encuentran alrededor de la media aritmética, asegurando que tanto la tensión como la VTHD se encuentren controlados, evitando

estar fuera de los límites en la mayor parte del tiempo. Mientras que la tasa de distorsión armónica de corriente y el flicker cuentan con un sesgo positivo, comprobando que existen valores atípicos elevados. Esto influye en la forma de distribución de los datos, permitiendo una mayor deformación en la onda sinusoidal de corriente.

Figura 10

Histogramas y curvas de probabilidad correspondientes al voltaje RMS, THDV, THDi y flicker Pst de la empresa embotelladora.



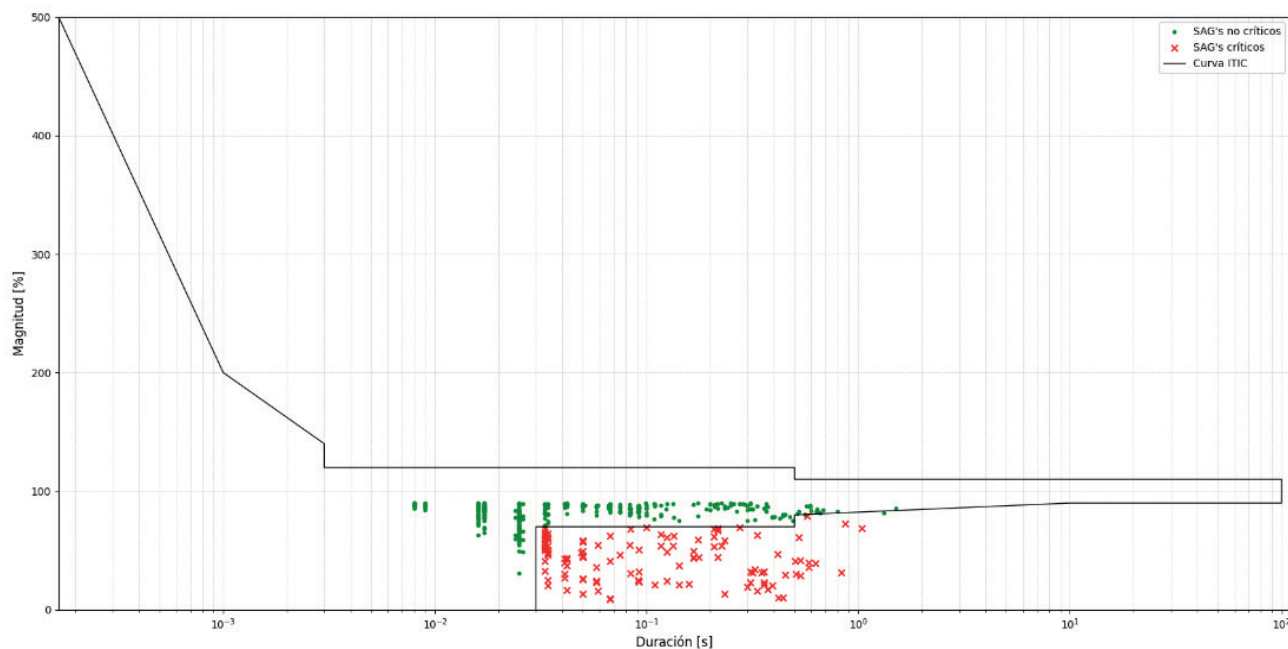
4.8 Análisis de huecos de tensión en la Empresa Cartonera

Durante los seis meses, se identificaron 1123 huecos de tensión, de los cuales 120 fueron críticos (fuera de

la curva ITIC). Julio de 2024 fue el mes más afectado, con 34 huecos críticos (magnitud 13,39 %-72,62 %, duración 0.033-1.042 s), atribuidos a fallas en líneas de distribución por lluvias intensas y cortocircuitos en alimentadores.

Figura 11

Curva ITIC con todos los huecos de tensión registrados en la empresa de cartonera.



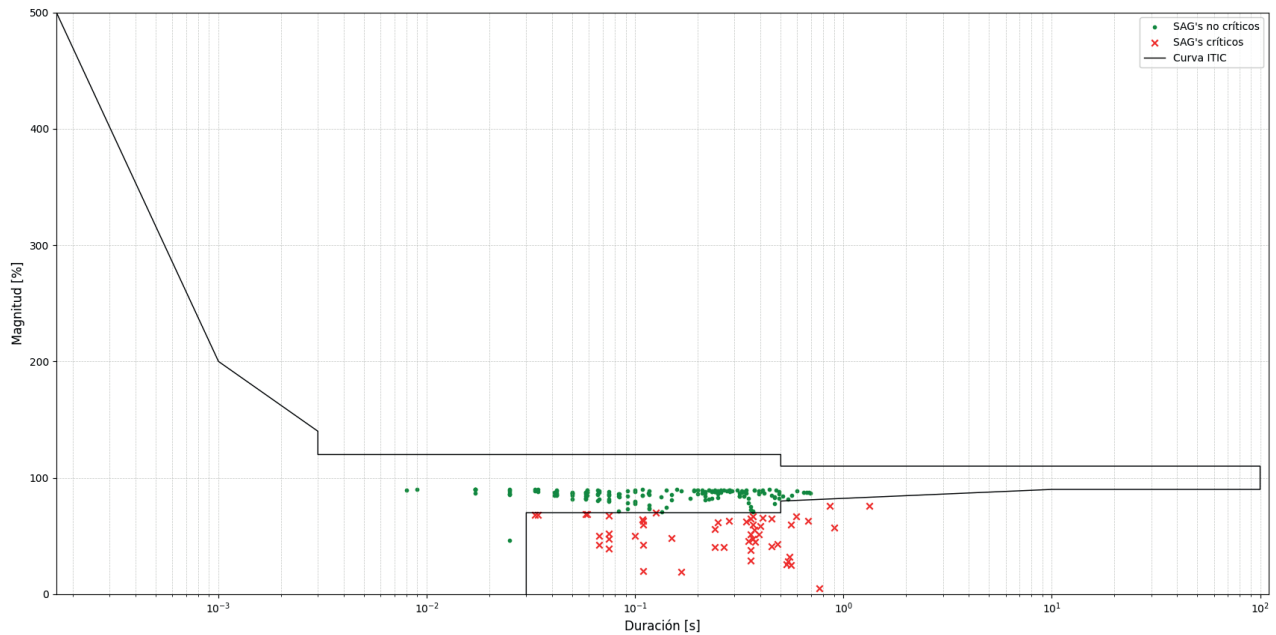
4.9 Análisis de huecos de tensión en la Empresa de Embotelladora

Se registraron 222 huecos de tensión, con 52 críticos, siendo julio de 2024 el pico con 22 eventos

(magnitud 13,39 %-72,62 %, duración 0.033-1.042 s). La menor incidencia se explica por su cercanía a la subestación principal, reduciendo la impedancia de la línea.

Figura 12

Curva ITIC con todos los huecos de tensión registrados en la empresa de embotelladora.



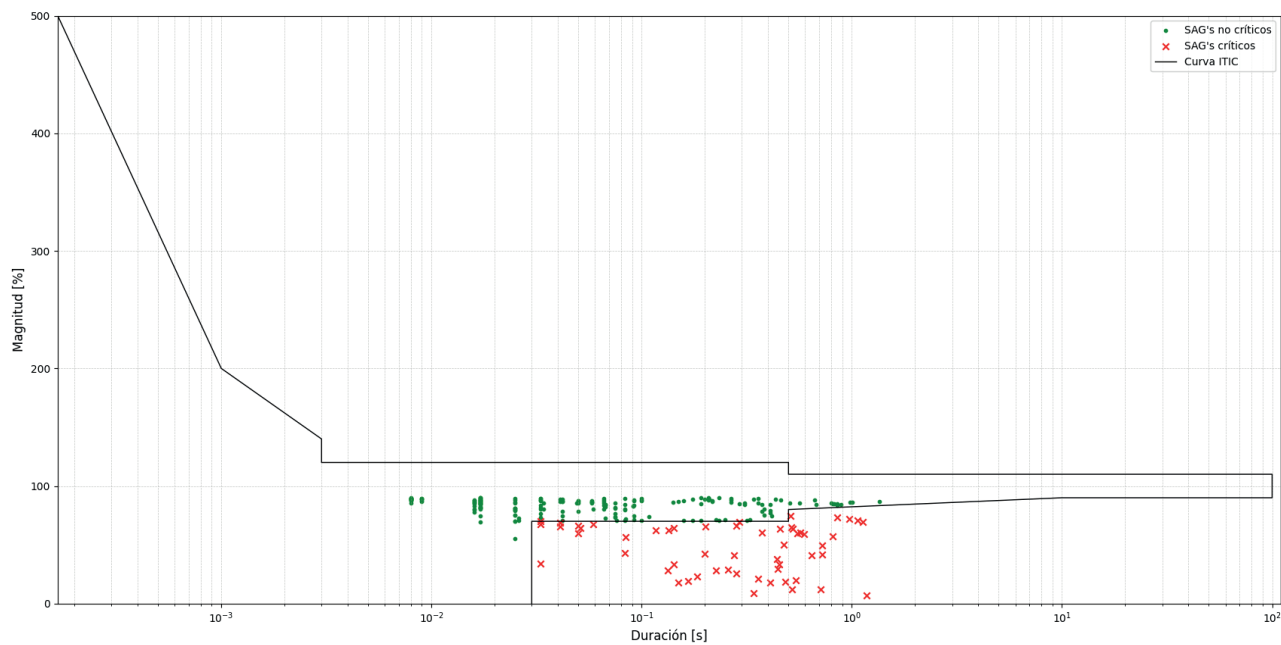
4.10 Rendimiento y Proyección del SagFighter

En el edificio corporativo, se analizaron 254 huecos (55 críticos) a 23 kV. El SagFighter, instalado en la salida de la subestación, corrigió:

- Huecos críticos: 46 de 55 (83,64 %). Como un ejemplo de un hueco de tensión mitigado está el hueco del 15/9/2024 (entrada 13,39 %, 0,441 s) mitigado a 92,9 %, dentro de tolerancia.
- Huecos no críticos: 199 de 199 (100 %), eliminando impacto en cargas sensibles.

Figura 13

Curva ITIC con todos los huecos de tensión registrados en el edificio de servicios corporativos.



Así como ocurrió con la empresa cartonera y la empresa de bebidas embotelladas, el mes crítico dentro del periodo de control fue julio de 2024, con un total de 17 huecos de tensión críticos. Se puede observar que, del total de 55 huecos de tensión críticos registrados, 9 de estos no se mitigaron en el periodo de julio a diciembre 2024. Esto sugiere que, en efecto, la efectividad del SagFighter es superior al 80 %, dando una efectividad real del 83,64 % en la mitigación de huecos de tensión críticos.

Como parte del estudio, es comprobar que esta alternativa puede significar una gran mejora en la productividad de las empresas, asegurando un tiempo de operación más constante y protegiendo a los equipos de eventos críticos que pueden reducir la vida útil de la maquinaria.

Si se proyecta la efectividad calculada (83,64 %) sobre las empresas estudiadas, principalmente en la

cartonera, ya que es la más afectada con respecto a huecos de tensión, estos se verán reducidos.

Proyección en la cartonera: En el periodo de estudio, comprendido del 1 de julio al 31 de diciembre de 2024, se registraron un total de 563 huecos de tensión, divididos en 120 críticos y 443 no críticos.

Si utilizamos la efectividad global, tendríamos una cantidad aproximada de 20 huecos de tensión en el periodo de estudio (menos de 4 huecos de tensión críticos por mes). Utilizando la efectividad del SagFighter para los eventos no críticos, los 875 eventos registrados en el periodo de estudio se mitigarían, mejorando considerablemente la estabilidad del sistema y minimizando las posibles interrupciones de producción en la planta.

Proyección en la empresa embotelladora: Para la empresa embotelladora, en el periodo de control, se

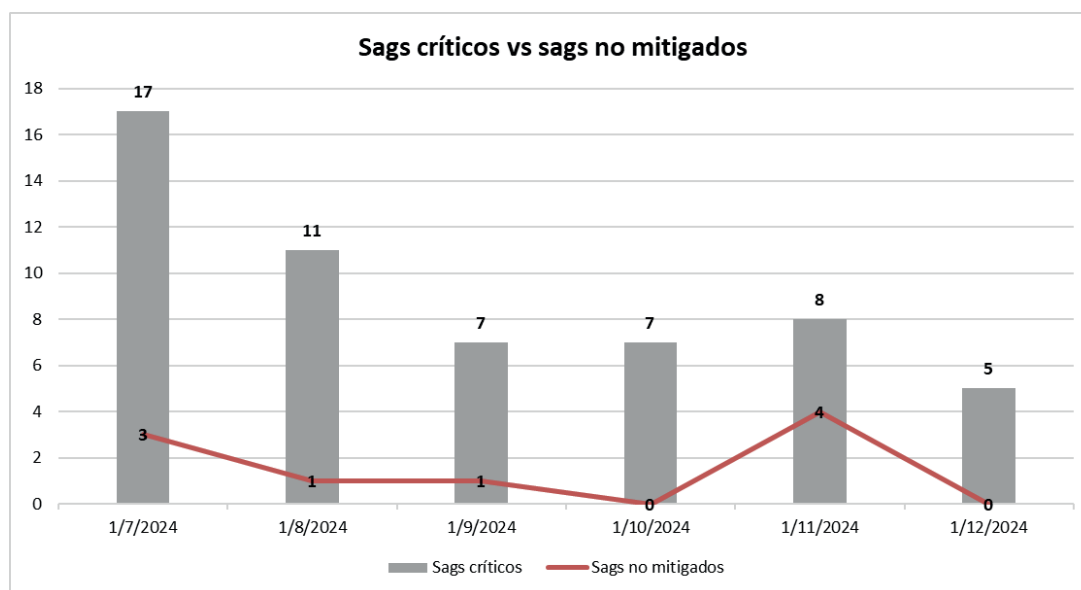
registraron un total de 222 huecos de tensión, divididos en 52 críticos y 170 no críticos.

Al aplicar la efectividad global, se estima que habría unos 9 huecos de tensión durante el periodo de estudio. Al emplear la capacidad del SagFighter para manejar

los eventos no críticos, los 170 casos registrados en ese lapso se ven notablemente reducidos, lo que mejora de forma significativa la estabilidad del sistema y disminuye las posibles interrupciones en la producción de la planta.

Figura 14

Comparación entre los huecos de tensión críticos y los huecos de tensión mitigados, en el edificio de servicios corporativos



El análisis reveló que la cartonera enfrenta mayor exposición a huecos por su ubicación en alimentador urbano, en el cual otros clientes industriales de alta demanda están conectados, mientras que la empresa de bebidas se beneficia de su proximidad a la subestación. Los datos subrayan la importancia de un monitoreo continuo, como el realizado, para identificar patrones estacionales (julio como mes crítico) y causas específicas (fallas climáticas, contactos animales y otros).

5. Conclusión

Los huecos de tensión son un problema crítico en sistemas de distribución. El SagFighter, con 83,64 % de efectividad en huecos críticos y 100 % en no críticos, ofrece una solución práctica, reduciendo significativamente posibles paros de producción y, en consecuencia, los costos. Este estudio destaca la necesidad del monitoreo continuo de la calidad de energía de las industrias y la necesidad de aplicar

tecnologías de mitigación en sus plantas, para optimizar la calidad de energía bajo la normativa SIGET (2014) y estándares internacionales cuando de huecos de tensión se trata.

Referencias

Baggini, A. (Ed.). (2008). *Handbook of power quality*. John Wiley & Sons.

Barcón, S., Guerrero, R y Martínez, I. (2012). *Calidad de la energía: Factor de potencia y filtrado de armónicas*. McGraw Hill.

Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S. & Wayne, Beaty H. (2012). *Electrical power systems quality*. McGraw Hill.

Echevarría, C., Jesurun-Clements, N., Mercado Díaz, J. E. y Trujillo, C. (2017). *Integración eléctrica centroamericana: Génesis, beneficios y prospectiva del Proyecto SIEPAC*. Banco Interamericano de Desarrollo.

Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2019). *IEEE recommended practice for monitoring electric power quality*. IEEE Xplore. 10.1109/IEEESTD.2019.8796486

Martínez Basulto, L y Torrico de la Reza, J. (2023). *Calidad de energía en sistemas de potencia: Armónicas y algo más*. Barkerbooks.

Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones. (2014). *Normas de calidad del servicio de los sistemas de distribución*. <https://www.siget.gob.sv/download/normas-de-calidad-del-servicio-de-los-sistemas-de-distribucion/>