

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**PROPUESTA DE SOLUCIÓN A PROBLEMAS DE CALIDAD DE
ENERGÍA EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN CON ÉNFASIS
EN VARIACIONES EN MAGNITUD**

PRESENTADO POR:

SAMUEL ODÍN CALDERÓN BARRERA

PARA OPTAR AL GRADO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIO 2025

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

M. Sc. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL:

LIC. PEDRO ROSALIO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. LUIS SALVADOR BARRERA ORELLANA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR INTERINO:

ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título:

**PROPUESTA DE SOLUCIÓN A PROBLEMAS DE CALIDAD DE
ENERGÍA EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN CON ÉNFASIS
EN VARIACIONES EN MAGNITUD**

Presentado por:

SAMUEL ODÍN CALDERÓN BARRERA

Trabajo de Graduación aprobado por:

Docente Asesor:

ING. DAVID JAVIER BERRIOS CRUZ

SAN SALVADOR, JULIO 2025

Trabajo de graduación aprobado por:

Docente Asesor:

ING. DAVID JAVIER BERRIOS CRUZ

NOTA Y DEFENSA FINAL


En esta fecha, jueves 26 de junio de 2025, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 5:00 p.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Werner David Meléndez Valle
Director Interino


Firma



2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario


Firma

Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

- ING. DAVID JAVIER BERRIOS CRUZ
(Docente Asesor)


Firma

- DR. CARLOS OSMIN POCASANGRE JIMÉNEZ


Firma

- MSC. JORGE ALBERTO ZETINÓ CHICAS


Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

PROPUESTA DE SOLUCIÓN A PROBLEMAS DE CALIDAD DE ENERGÍA EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN CON ÉNFASIS EN VARIACIONES EN MAGNITUD

A cargo del Bachiller:

- CALDERÓN BARRERA SAMUEL ODÍN

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 9.9
(*noventa y nueve*)

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a mis padres, Wilber y Marcia, por su paciencia y amor en este tedioso camino.

Papá, gracias por tu dedicación no únicamente como padre de familia, sino como docente. Tu dedicación y preocupación por la enseñanza son un claro ejemplo de compromiso y pasión, que me han inspirado a dar lo mejor de mí en este proceso.

Mamá, gracias por tu paciencia y amor. Sé que, sin eso, no estaría acá y no estaría motivado a superarme cada vez más. Tu sacrificio, esas noches en vela trabajando en tus investigaciones, me han mostrado lo que significa esforzarse con pasión y entrega, y eso me ha dado la fuerza para llegar hasta este punto.

Agradezco al Ingeniero Berrios, mi docente asesor, por haber depositado su confianza en mí para llevar a cabo este proyecto. Gracias a su apoyo y acompañamiento, he logrado aumentar mis capacidades en el amplio mundo de la calidad de energía.

Agradezco a mi jefe, Ingeniero Armando Solórzano, por depositar su confianza en mí. Su apoyo ha sido fundamental a lo largo de mi trayectoria profesional. Gracias a los permisos otorgados y a los ánimos constantes, he podido superar diversos desafíos y alcanzar importantes metas. Sin su respaldo, no estaría en este punto de mi carrera, y por ello le estoy profundamente agradecido.

Agradezco al Ingeniero Numa Jiménez por confiar en mí tanto a nivel académico como profesional. Su apoyo ha sido fundamental para seguir adelante en la empresa y me ha motivado enormemente a finalizar mi tesis.

Finalmente, a mí mismo, por el esfuerzo sostenido. Ser hijo de un profesor exigente vino con su carga, y hacer esta tesis en solitario fue la cereza del pastel. La Universidad me enseñó a lidiar con lo que venga, y aquí estoy, contra todo pronóstico.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
OBJETIVO GENERAL	13
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
ALCANCES	16
ANTECEDENTES	18
JUSTIFICACIÓN	19
RESULTADOS ESPERADOS	20
CAPÍTULO UNO: MARCO TEÓRICO	21
1.1 Evolución de la problemática de la calidad de energía	22
1.2 El concepto de calidad de energía	27
1.3 Problemas más comunes de calidad de energía	28
1.3.1 Interrupciones.....	28
1.3.1.1 Relación de las interrupciones con los huecos de tensión.....	30
1.3.2 Desbalance de voltaje o corriente	31
1.3.2.1 Impacto del desbalance de corriente y/o tensión en los equipos eléctricos .	31
1.3.3 Flicker.....	32
1.3.3.1 Medición del Flicker.....	33
1.3.4 Distorsión por armónicas de corriente y voltaje	33
1.3.5 Sobrevoltajes	37
1.3.5.1 Causas de sobrevoltajes transitorios (Swells).....	37
1.3.6 Huecos de Tensión	39
1.3.6.1 Caracterización de los Huecos de Tensión	41
1.3.6.2 Impacto de los huecos de tensión en diferentes sectores productivos	41
1.3.6.3 Causas de los huecos de tensión	42
1.3.6.4 Medidas de mitigación de huecos de tensión.....	43
CAPÍTULO DOS: METODOLOGÍA	54
2.1 Planificación de la medición	55
2.2 Instalación de equipos de medición	56
2.3 Extracción y procesamiento de datos.....	56
2.4 Análisis de la calidad de energía en los usuarios definidos	57

2.5	Explicación del funcionamiento del código.....	59
CAPÍTULO TRES: RESULTADOS		64
3.1	Normativa aplicable al estudio	65
3.2	Equipos analizadores de calidad de energía utilizados.....	70
3.3	Empresa cartonera.....	71
3.3.1	Regulación de tensión	72
3.3.2	Armónicos	74
3.3.2.1	Tasa de distorsión armónica de voltaje.....	74
3.3.2.2	Tasa de distorsión armónica de corriente.....	75
3.3.3	Flicker.....	75
3.3.4	Análisis de la curva de probabilidad	77
3.3.5	Análisis de los meses con mayor presencia de huecos de tensión.	78
3.4	Empresa embotelladora.....	85
3.4.1	Regulación de tensión	86
3.4.2	Armónicos	88
3.4.2.1	Tasa de distorsión armónica de voltaje.....	88
3.4.2.2	Tasa de distorsión armónica de corriente.....	90
3.4.3	Flicker.....	90
3.4.4	Análisis de la curva de probabilidad	92
3.4.5	Análisis de los meses con mayor presencia de huecos de tensión.	93
3.5	Análisis de rendimiento de SagFighter.....	97
3.5.1	Hueco de tensión no mitigado	98
3.5.2	Hueco de tensión mitigado	99
3.5.3	Análisis de huecos de tensión en edificio de servicios corporativos.....	100
3.5.4	Proyección de resultados en empresas estudiadas	106
3.5.4.1	Empresa cartonera.....	107
3.5.4.2	Empresa embotelladora	109
CAPÍTULO CUATRO: CONCLUSIONES.....		112
BIBLIOGRAFÍA.....		115
ANEXOS.....		117

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1. Interrupción momentánea.....	29
Figura 2. Forma de onda de corriente y espectro armónico para una corriente de entrada de un variador de velocidad (ASD).....	34
Figura 3. Sobretensión instantánea causada por una falla línea a tierra.....	38
Figura 4. Hueco de tensión causado a partir de falla línea a tierra (IEEE, 2019).	40
Figura 5. Diagrama de conexión del SagFighter instalado en un edificio de servicios corporativos.	49
Figura 6. Perfil de tensión RMS en las tres fases de la cartonera.	72
Figura 7. Interrupción en la cartonera del 1º de septiembre de 2024.	73
Figura 8. Tasa de Distorsión Armónica (THDV) de la cartonera.....	74
Figura 9. Tasa de Distorsión de Corriente (THDi) en la cartonera.....	75
Figura 10. Flicker de Corta Duración (Pst) en la cartonera.	76
Figura 11. Histogramas y curvas de probabilidad correspondientes al voltaje RMS, THDV, THDi y Flicker Pst de la empresa cartonera.....	78
Figura 12. Huecos de tensión detectados en el mes de Julio 2024, en la empresa cartonera.	79
Figura 13. Huecos de tensión detectados en el mes de Agosto 2024, en la empresa cartonera.	81
Figura 14. Huecos de tensión detectados en el mes de Octubre 2024, en la empresa cartonera.....	83
Figura 15. Perfil de tensión RMS en las tres fases de la embotelladora.....	86
Figura 16. Interrupción sostenida detectada en noviembre 2024, en la empresa embotelladora.	88
Figura 17. Tasa de distorsión armónica de voltaje (VTHD) de la embotelladora.	89
Figura 18. Tasa de distorsión armónica de corriente (ITHD) de la embotelladora.	90
Figura 19. Flicker de Corta Duración (Pst) en la embotelladora.....	91
Figura 20. Histogramas y curvas de probabilidad correspondientes al voltaje RMS, THDV, THDi y Flicker Pst de la empresa embotelladora.	92
Figura 21. Huecos de tensión detectados en el mes de Julio 2024, en la empresa embotelladora.	93
Figura 22. Huecos de tensión detectados en el mes de Agosto 2024, en la empresa embotelladora.	95
Figura 23. Huecos de tensión detectados en el mes de Septiembre 2024, en la empresa embotelladora.	96
Figura 24. Tensión RMS a la entrada del SagFighter del hueco de tensión No. 10.	98
Figura 25. Tensión RMS a la salida del SagFighter del hueco de tensión No. 10.	99
Figura 26. Tensión RMS a la entrada del SagFighter del hueco de tensión No. 46.	99
Figura 27. Tensión RMS a la salida del hueco de tensión No. 46.....	100
Figura 28. Curva ITIC con todos los huecos de tensión registrados en el edificio de servicios corporativos.	101
Figura 29. Proporción del tipo de falla relacionada a los huecos de tensión en el edificio de servicios corporativos.	104
Figura 30. Causalidad de los huecos de tensión en el edificio de servicios corporativos.	105

Figura 31. Comparación entre los huecos de tensión críticos y los huecos de tensión mitigados en el edificio de servicios corporativos.....	106
Figura 32. Curva ITIC con todos los huecos de tensión registrados en la empresa de cartonera.....	107
Figura 33. Comparación entre los huecos de tensión críticos y la proyección de los mitigado, en la empresa cartonera.	108
Figura 34. Proyección de huecos de tensión mitigados en la curva ITIC, en la empresa cartonera.....	109
Figura 35. Curva ITIC con todos los huecos de tensión registrados en la empresa de embotelladora.	109
Figura 36. Comparación entre los huecos de tensión críticos y la proyección de los mitigado, en la empresa embotelladora.....	110
Figura 37. Proyección de huecos de tensión mitigados en la curva ITIC, en la empresa embotelladora.	111

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. Niveles máximos y mínimos de tensión según la zona de servicio.....	67
Tabla 2. Límites de distorsión armónica individual y total de voltaje. (SIGET, s.f.).....	68
Tabla 3. Límites de distorsión armónica individual y total de corriente. (SIGET, s.f.).....	69
Tabla 4. Limite Flicker. (SIGET, s.f.)	69
Tabla 5. Características generales de los equipos de medición utilizados.	70
Tabla 6. Detalle y causas de los huecos de tensión de Julio 2024, en la empresa cartonera..	79
Tabla 7. Detalles y causas de los huecos de tensión en Agosto 2024, en la empresa cartonera.	81
Tabla 8. Detalles y causas de los huecos de tensión de Octubre 2024, en la empresa cartonera.....	83
Tabla 9. Detalles y causas de los huecos de tensión de Julio 2024, en la empresa embotelladora.	93
Tabla 10. Detalles y causas de los huecos de tensión de Agosto 2024, en la empresa embotelladora.....	95
Tabla 11. Detalles y causas de los huecos de tensión de Septiembre 2024, en la empresa embotelladora.....	96
Tabla 12. Detalles y causas de los huecos de tensión en el periodo medido en el edificio de servicios corporativos.	101

INTRODUCCIÓN

En los sistemas eléctricos modernos, especialmente en la industria, la calidad de energía se ha transformado en un tema crítico debido a la inclinación por equipos de electrónica sensible. La transición de los equipos modernos ha significado en una mejoría en la producción y ahorros en costos si de mano de obra hablamos, pero estos equipos han sido una hoja de doble filo, ya que debido a su sensibilidad se vuelven mucho más susceptibles a las perturbaciones en la red eléctrica.

Los huecos de tensión son la perturbaciones más comunes en las redes de distribución y transmisión de energía; estos problemas de calidad pueden significar daños significativos en equipos y/o reducción en el tiempo de vida útil. Este tipo de perturbaciones pueden incluso parar la producción de plantas industriales, significando pérdidas económicas para estos clientes.

El presente trabajo tiene por objetivo la investigación y propuesta de soluciones comerciales, para lograr mitigar los huecos de tensión en los sistemas eléctricos, con el fin de mejorar el suministro eléctrico entregado a los usuarios industriales y residenciales.

OBJETIVO GENERAL

Proponer soluciones comerciales a problemas de calidad de energía en los sistemas de distribución con énfasis en variaciones de magnitud

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar estadísticamente los datos obtenidos de los equipos analizadores de calidad de energía instalados en la red de distribución, específicamente en clientes de media tensión, para identificar patrones y problemas recurrentes de calidad de energía.
- Identificar a partir de los datos recopilados, los principales problemas de calidad de energía a los que están expuestos los usuarios conectados en media tensión, con un enfoque particular en la detección y clasificación de huecos y subidas de tensión según las normativas IEEE 1159 e IEC 61000-4-30.
- Detectar las causas de las variaciones de tensión en la red y determinar la frecuencia de huecos críticos que exceden los límites de operación establecidos por las distintas curvas de tolerancia de tensión, evaluando su impacto en la operación de los sistemas eléctricos industriales.
- Investigar las alternativas de mitigación de problemas de calidad de energía disponibles en el mercado, enfocándose en soluciones viables para la industria de El Salvador, con especial atención a las tecnologías y equipos que puedan corregir o reducir los efectos de los huecos de tensión.

- Proponer equipos y tecnologías específicas para la mitigación de los efectos causados por los huecos de tensión, evaluando su viabilidad técnica y económica en el contexto de los usuarios industriales de alta tensión y usuarios residenciales y comerciales de baja tensión.
- Comparar la calidad de la energía en la entrada y salida de la subestación del cliente para evaluar la funcionalidad y el desempeño de los equipos mitigadores propuestos, asegurando que cumplan con los requisitos operativos y mejoren la estabilidad del suministro eléctrico.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La calidad de la energía eléctrica es fundamental para el rendimiento eficiente de sistemas industriales y comerciales. Los huecos de tensión, que se manifiestan como caídas o elevaciones temporales en el voltaje, pueden interrumpir operaciones, reducir la vida útil de equipos y causar pérdidas económicas. A pesar de las normativas internacionales como IEEE 1159 e IEC 61000-4-30, la identificación precisa y la mitigación de estos problemas siguen siendo un desafío.

La investigación propuesta se centrará en medir los huecos de tensión en clientes industriales con alta demanda durante un periodo de tres meses, utilizando equipos analizadores de calidad de energía. El objetivo es identificar las características y causas subyacentes de estos fenómenos, así como evaluar su frecuencia y severidad en comparación con los estándares establecidos.

Basado en los datos obtenidos, se propondrán soluciones para mitigar los efectos de los huecos de tensión. Esto incluirá la evaluación de tecnologías y dispositivos disponibles en el mercado, y la colaboración con proveedores para determinar la efectividad de las soluciones en mejorar la calidad del suministro eléctrico. La investigación concluirá con una evaluación comparativa de la calidad de energía antes y después de implementar las soluciones.

ALCANCES

- **Mediciones y Análisis de Datos:** Se realizarán mediciones durante un período mínimo de 3 meses en clientes representativos de la industria con alta demanda energética que disponen de analizadores de calidad de energía. Este período de medición permitirá una evaluación exhaustiva de la calidad de la energía suministrada y la identificación de problemas recurrentes en los sistemas de distribución eléctrica, con un enfoque particular en los huecos de tensión.
- **Identificación y Clasificación de Problemas:** A partir de los datos recopilados, se identificarán los problemas recurrentes de calidad de energía, centrándose en los huecos de tensión. Se llevará a cabo una clasificación de estos huecos de tensión conforme a las normativas internacionales IEEE 1159 e IEC 61000-4-30, y se evaluará su impacto en el suministro eléctrico para clientes de media tensión.
- **Propuesta y Evaluación de Alternativas de Mitigación:** Se investigarán y se propondrán alternativas de mitigación para los problemas identificados, con especial atención en los huecos de tensión. Las alternativas serán evaluadas en términos de su viabilidad técnica y económica, así como su efectividad para mejorar la calidad del suministro eléctrico en la red de distribución.
- **Colaboración con Proveedores:** Se buscará establecer contacto con proveedores nacionales de soluciones industriales para problemas de calidad de energía, con el objetivo de obtener acceso a dispositivos de mitigación. Estos dispositivos serán evaluados para determinar su efectividad en la corrección de

huecos de tensión. La colaboración permitirá comparar el desempeño de las soluciones propuestas en condiciones reales.

- Evaluación de Desempeño de Mitigadores: Se llevará a cabo una evaluación comparativa de la calidad de energía en la entrada y salida de la subestación del cliente para medir la funcionalidad y el desempeño de los equipos mitigadores propuestos. Esta evaluación permitirá verificar la eficacia de las soluciones implementadas en la reducción de los huecos de tensión y en la mejora general de la calidad del suministro eléctrico.

ANTECEDENTES

Dentro de los diversos fenómenos que pueden afectar la calidad del servicio se encuentran los huecos de voltaje, las sobretensiones y las interrupciones, ya sean momentáneas o sostenidas, distorsiones armónicas y Flicker. Estos eventos pueden influir en la operación de equipos y procesos controlados por dispositivos electrónicos sensibles. Para evaluar estos impactos, se pueden seguir las normas IEEE 1519 y aplicar medidas de mitigación según las recomendaciones de la IEEE 1100. Además, la norma IEEE 493 establece los requisitos de confiabilidad para los circuitos de alimentación industrial, con un SAIFI máximo de 1.956 interrupciones por año y una SAIDI promedio de 1.32 horas por falla.

Dentro de este contexto se han planteado algunas investigaciones, de las cuales se pueden destacar: "Estudio preliminar de calidad de energía eléctrica en sistemas de distribución en El Salvador", "Estudio de Calidad de Energía en Plantas Industriales, con énfasis en afectaciones por Interrupciones momentáneas y Huecos de Tensión", "Evaluación de las normas de calidad del servicio en los sistemas de distribución de SIGET" y "Estudio del desbalance de tensiones y sus efectos en la calidad del producto técnico para sistemas de distribución a nivel industrial". Este trabajo profundizará en los estudios anteriormente efectuados y los expandirá hacia la red de distribución en general, centrándose en la solución de problemas de calidad de energía, específicamente en los huecos de tensión.

JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de esta investigación proporcionará una comprensión exhaustiva de los huecos de tensión en los sistemas de distribución eléctrica, un problema que afecta significativamente la operación de equipos industriales y comerciales. Al medir y analizar estos fenómenos, la investigación permitirá identificar las causas subyacentes y evaluar la efectividad de diversas soluciones de mitigación.

Los resultados de este estudio serán de gran utilidad para empresas e industrias que enfrentan desafíos relacionados con la calidad de la energía. Las metodologías propuestas podrán aplicarse para mejorar la estabilidad y eficiencia del suministro eléctrico, reduciendo así el impacto económico de los huecos de tensión. Además, los hallazgos contribuirán a la selección e implementación de tecnologías adecuadas para la corrección de estos problemas.

La investigación no solo ofrecerá soluciones prácticas adaptadas a las necesidades locales, sino que también proporcionará una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones en el campo de la calidad de la energía. Este enfoque sistemático ayudará a mejorar el rendimiento operativo de los sistemas eléctricos, beneficiando a las empresas y a la industria en general.

RESULTADOS ESPERADOS

- Obtener un análisis detallado de los huecos de tensión en la red de distribución eléctrica, incluyendo su frecuencia, duración y magnitud en clientes industriales con alta demanda. Este análisis permitirá cuantificar y estimar los eventos a los que se ven expuestos los usuarios en la red.
- A través de la investigación, se identificarán las principales causas de los huecos de tensión, proporcionando información valiosa sobre los factores que contribuyen a estos fenómenos y su impacto en la calidad de la energía.
- Se llevará a cabo una evaluación de las tecnologías y dispositivos disponibles en el mercado para mitigar los efectos de los huecos de tensión. Esto incluirá la propuesta y la evaluación de soluciones efectivas adaptadas a las condiciones específicas de los clientes industriales y comerciales.
- Demostrar estadísticamente las mejoras en la estabilidad y eficiencia del suministro eléctrico, tras la implementación de las soluciones propuestas, se busca evidenciar que estas soluciones reducen las interrupciones momentáneas y pérdidas económicas asociadas con los huecos de tensión.
- Se ofrecerán recomendaciones prácticas y basadas en evidencia para la implementación de soluciones de mitigación de huecos de tensión en la industria de El Salvador.

CAPÍTULO UNO: MARCO TEÓRICO

1.1 Evolución de la problemática de la calidad de energía

Los problemas de calidad de energía han adquirido una relevancia creciente en los últimos años. En el pasado, estos inconvenientes afectaban principalmente a las centrales eléctricas y a los ingenieros encargados de la operación de calderas, debido a que las fluctuaciones en la calidad del suministro podían comprometer la estabilidad y eficiencia del proceso de generación. En las plantas termoeléctricas, por ejemplo, el control de las calderas dependía de sistemas electromecánicos y eléctricos sensibles a variaciones de voltaje y frecuencia. Un desbalance en la tensión o la presencia de armónicos podía alterar la combustión, afectar la presión de vapor y comprometer la eficiencia térmica, lo que obligaba a los ingenieros a realizar ajustes constantes para evitar daños en los equipos o una reducción en la producción de energía.

Actualmente, la comunidad de ingenieros electricistas se enfrenta al reto constante de analizar, diagnosticar y proponer soluciones efectivas para abordar los problemas de calidad de energía. Aunque históricamente este tema no recibió la atención necesaria dentro de la industria manufacturera, en la actualidad es un aspecto fundamental que preocupa tanto a las distribuidoras de energía como a los consumidores finales, debido a las repercusiones económicas, operativas y técnicas que conlleva.

Los profesionales que se dedican a resolver problemas de calidad de energía en este siglo han sido capacitados de manera específica para abordar, estudiar y resolver estos inconvenientes con herramientas avanzadas y métodos más precisos. A medida que las redes eléctricas evolucionan y se vuelven más

interconectadas, también surgen nuevos desafíos en la gestión de la calidad de energía, lo que requiere un enfoque más técnico y especializado para su mitigación.

Tanto la industria eléctrica como los usuarios finales han comenzado a mostrar una preocupación creciente por la calidad de energía. Esta inquietud se debe, principalmente, a cuatro factores fundamentales que han impulsado el interés en este tema:

1. **El uso de equipos de última generación:** Estos dispositivos, que incluyen controles basados en microprocesadores y dispositivos electrónicos de potencia, son significativamente más sensibles a las variaciones en la calidad de la energía en comparación con los equipos utilizados en el pasado. Esto se debe a que estos dispositivos dependen de una alimentación eléctrica estable y libre de perturbaciones para funcionar correctamente.
2. **La importancia de la eficiencia del sistema eléctrico:** En la búsqueda de una mayor eficiencia energética, se han implementado cada vez más dispositivos como variadores de velocidad y bancos de capacitores en paralelo para la corrección del factor de potencia. Si bien estas soluciones ayudan a reducir las pérdidas de energía y optimizar la operación del sistema, también pueden introducir nuevos problemas de calidad de energía si no se gestionan adecuadamente.
3. **Un mayor nivel de conciencia en los usuarios finales:** Con el avance de la tecnología y el acceso a más información, los usuarios han adquirido un mayor conocimiento sobre los problemas de calidad de energía y sus efectos

en los equipos eléctricos y electrónicos, sobre todo los usuarios o clientes industriales. Esto ha llevado a una mayor exigencia por parte de los clientes a las empresas distribuidoras para garantizar un suministro estable y confiable.

4. **El crecimiento de la interconexión de sistemas:** En la actualidad, una gran cantidad de equipos y dispositivos están interconectados en las redes eléctricas. Esto significa que la falla de un solo componente y las perturbaciones inherentes a la transmisión y distribución de energía puede generar efectos en cascada y afectar a múltiples usuarios, provocando pérdidas económicas y operativas significativas, como lo expone Echevarría et al. (2017).

El vínculo entre estas cuatro razones radica en el esfuerzo constante por mejorar la productividad y la eficiencia operativa en todas las áreas relacionadas con la energía eléctrica. A medida que la tecnología avanza y los requerimientos energéticos aumentan, se vuelve indispensable garantizar un suministro eléctrico confiable y de alta calidad que minimice interrupciones y perturbaciones en los procesos industriales y comerciales.

El sector industrial, en la búsqueda de la mejora continua de la eficiencia de su línea productiva y disminuir al mismo tiempo las pérdidas por paradas de su línea de producción, han tendido a desarrollar o comprar en el mercado dispositivos más rápidos, productivos y eficientes que contribuyan a la rentabilidad y, al mismo tiempo, permitan aplazar costosas inversiones en infraestructura eléctrica. No obstante, paradójicamente, muchos de estos equipos altamente eficientes para las

líneas productivas, son más susceptibles a interrupciones y problemas de calidad de energía, lo que puede comprometer su desempeño y reducir su vida útil. Es decir, puede existir un efecto rebote, ya que, al eficientizar procesos de producción para evitar pérdidas económicas, el uso de equipos específicos para estos procesos tiende a ser más frágiles y sensibles a las perturbaciones eléctricas del sistema.

Además, la automatización de procesos en diversas industrias ha incrementado la dependencia de los equipos eléctricos y electrónicos con respecto a la continuidad y estabilidad del suministro de energía. Un pequeño desbalance en la tensión, una distorsión armónica elevada o una fluctuación en la frecuencia pueden ocasionar fallos en los sistemas de control, lo que se traduce en pérdidas de producción y elevados costos de mantenimiento.

Dado el impacto que la calidad de energía tiene en el sector industrial moderno y en los electrodomésticos (como las computadoras, televisores, lavadoras, etc.) de los clientes residenciales, se han promovido diferentes estrategias para mejorar la regulación y el monitoreo de los sistemas eléctricos. Algunas de las tendencias y avances en este campo incluyen:

1. **Regulación gubernamental más estricta:** En muchos países, los gobiernos han revisado y actualizado sus leyes y normativas para garantizar que la calidad de energía suministrada por las empresas distribuidoras cumpla con estándares adecuados. Esta regulación busca evitar que las compañías eléctricas ignoren deficiencias en sus redes y obliga a realizar inversiones en mejoras y mantenimiento. Así como también obliga a la industria que inyecta perturbaciones a la red, por la naturaleza de sus actividades, a mantener

estas bajo límites permisibles y tolerables dentro de una red de distribución o transmisión.

2. **Crecimiento de la generación distribuida:** La tendencia hacia la descentralización de la generación de energía ha cobrado relevancia en los últimos años. La generación distribuida, que incluye fuentes como paneles solares, turbinas eólicas, permite reducir la dependencia de grandes centrales eléctricas y mejorar la estabilidad del suministro. Pero a su vez estas tecnologías suelen estar acompañadas de inyección de armónicos a las redes, por la naturaleza de conversión de energía de estos sistemas (DC-AC).
3. **Interconexión de líneas de transmisión:** El Sistema de Interconexión Eléctrica de los Países de América Central es el primer sistema de transmisión regional, el cual cubre desde Panamá hasta Guatemala, con el fin de permitir el funcionamiento físico del Mercado Eléctrico Regional [9]. Este sistema es monitoreado de forma continua por el Ente Operador Regional, por lo que la aplicación de estándares internacionales para la calidad de la energía transmitida por el SIEPAC es fundamental, para garantizar una transmisión continua y de calidad.
4. **Desarrollo de nuevos índices de calidad de energía:** A lo largo del tiempo, se han creado métricas más precisas para evaluar los distintos aspectos de la calidad de energía. Estos índices permiten a los ingenieros y reguladores realizar análisis más detallados y tomar decisiones informadas sobre mejoras en la infraestructura eléctrica.

1.2 El concepto de calidad de energía

El concepto de calidad de energía no tiene una única definición universalmente aceptada, ya que puede variar dependiendo del marco de referencia utilizado. Desde el punto de vista de la industria eléctrica, la calidad de energía puede definirse como la capacidad del sistema de suministro eléctrico para proporcionar un servicio confiable y estable. En este sentido, las empresas distribuidoras suelen enfocarse en demostrar que cuentan con altos niveles de confiabilidad y disponibilidad en sus redes.

Por otro lado, desde la perspectiva de los diseñadores de equipos eléctricos y electrónicos, la calidad de energía se refiere a las características del suministro eléctrico que permiten el correcto funcionamiento de los dispositivos sin interrupciones ni fallos inesperados. En otras palabras, un sistema de energía de alta calidad es aquel que entrega electricidad con parámetros adecuados de voltaje, corriente y frecuencia, minimizando cualquier tipo de fluctuación o distorsión.

Según la IEEE [2019], la calidad de energía se define como la alimentación y puesta a tierra de equipos electrónicos sensibles de una manera que garantice su correcto desempeño. Bajo esta óptica, la calidad de energía también puede interpretarse como la capacidad del suministro eléctrico para mantener las condiciones adecuadas que permitan la operación continua de los equipos sin comprometer su rendimiento ni generar fallos en sus componentes.

1.3 Problemas más comunes de calidad de energía

Un problema de calidad de energía puede manifestarse en diversas formas, tales como:

- **Interrupciones de energía:** momentáneas o sostenidas
- **Dips o huecos de tensión:** Reducciones súbitas del voltaje.
- **Swells o sobrevoltajes momentáneos:** Aumento repentino del voltaje.
- **Desbalance de voltaje o corriente:** Desequilibrio entre fases en sistemas trifásicos.
- **Flicker:** Parpadeo en la iluminación debido a fluctuaciones de voltaje.
- **Distorsión armónica:** Presencia de armónicas en la señal de voltaje o corriente.

Cada uno de estos fenómenos tiene causas específicas y efectos negativos que pueden comprometer la operación de los equipos eléctricos y electrónicos. Por esta razón, la identificación, monitoreo y mitigación de estos problemas son aspectos esenciales en la ingeniería eléctrica moderna.

1.3.1 Interrupciones

Se considerará como interrupción toda falta de suministro de energía eléctrica en el punto de entrega al usuario (SIGET, s.f.). Este fenómeno puede afectar de manera significativa la estabilidad y continuidad del servicio eléctrico, causando inconvenientes tanto a usuarios residenciales como a industrias y comercios que dependen de un suministro constante de energía.

Existen dos tipos de interrupciones:

Interrupción momentánea: Según la SIGET (s.f.), son aquellas interrupciones que tienen una duración limitada hasta de tres (3) minutos, el cual es el tiempo requerido para restablecer los dispositivos de control y protección.

Interrupción sostenida: Cualquier interrupción no clasificada como momentánea. (SIGET, s.f.)

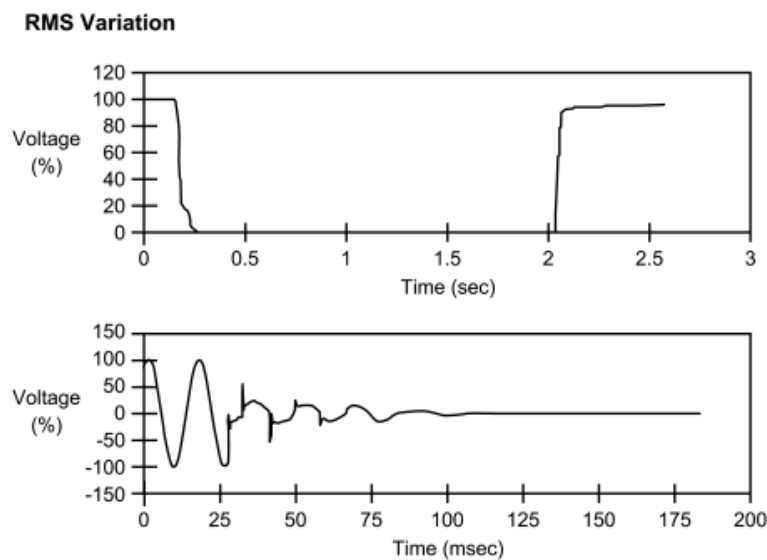


Figura 1. Interrupción momentánea.

En la figura 1, se puede observar la ausencia de voltaje RMS al momento de una interrupción momentánea. Así mismo, se puede observar como la onda sinusoidal de voltaje se deforma en este evento.

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 o sobrecargas inesperadas.

- **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.

1.3.1.1 Relación de las interrupciones con los huecos de tensión

Los huecos de tensión suelen preceder a las interrupciones. Esto se debe a que, cuando ocurre una falla en la red, se genera una caída temporal de voltaje antes de que el sistema de protección actúe y desconecte la carga afectada. Los Reclosers, con el objetivo de mantener el suministro eléctrico el mayor tiempo posible, realizan intentos automáticos de recierres.

Este proceso implica ciclos de apertura y cierre en un corto período de tiempo para despejar fallas temporales, evitando así la desconexión innecesaria de segmentos completos de la red, pero generando oscilaciones transitorias que se convierte en huecos de tensión mientras el sistema se estabiliza.

Los huecos de tensión existen entre el inicio de la falla y el disparo del dispositivo de protección. Dependiendo de la naturaleza de la falla y la configuración del sistema de protección, estos huecos pueden variar en profundidad y duración, afectando distintos tipos de equipos eléctricos.

1.3.2 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 por Baggini en el Handbook of Power Quality (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 bajo voltajes (**undervoltage**).

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 es conocido 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.

1.3.2.1 Impacto del desbalance de corriente y/o 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 $\pm 10\%$ 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.**

1.3.3 Flicker

A partir de lo comentado por Baggini (2008), el **flicker** es un fenómeno que se refiere a fluctuaciones en el nivel de voltaje, las cuales pueden provocar parpadeos molestos en la iluminación y afectar la estabilidad de ciertos equipos eléctricos. Estas fluctuaciones generalmente se deben a la conexión de cargas cíclicas como **hornos eléctricos o variadores de velocidad.**

El flicker se puede notar en la variación de intensidad en las luminarias, lo cual puede causar molestias visuales y afectar el rendimiento de tareas que requieren iluminación constante. Además, puede provocar efectos adversos en motores eléctricos, haciendo que cambien de velocidad de manera irregular y afectando su desempeño.

1.3.3.1 Medición del Flicker

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

1. **Pst: Corto plazo, cada 10 min.**
2. **Plt: Largo plazo, 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.

1.3.4 Distorsión por armónicas de corriente y voltaje

Los equipos electrónicos y el uso de cargas no lineales provocan una distorsión en la tensión y la corriente. 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.

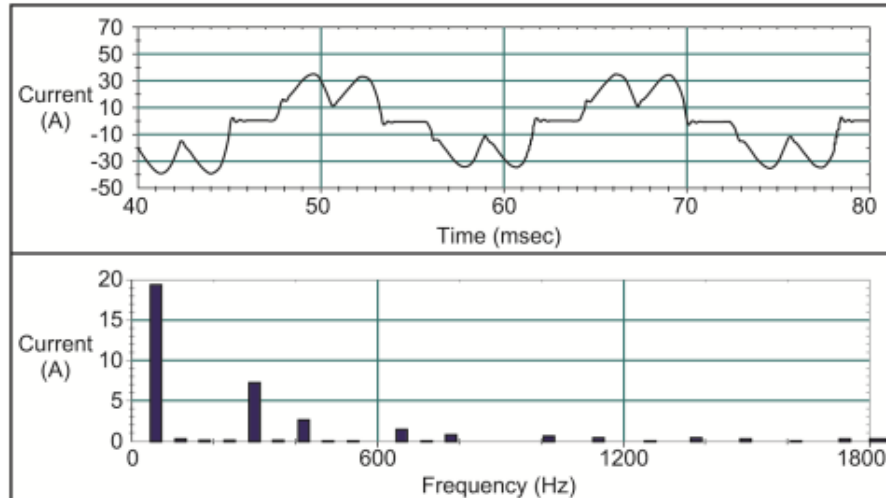


Figura 2. Forma de onda de corriente y espectro armónico para una corriente de entrada de un variador de velocidad (ASD).

En la figura 2, se puede observar la onda sinusoidal de corriente distorsionada por las armónicas presentes. En la gráfica de abajo, se observan las armónicas individuales, donde las que más afectan a la onda de corriente son la quinta, séptima, décimo primera y décimo tercera.

Existen tres 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 (AC-DC).
- **Dispositivos que funcionan con arco eléctrico**, como alumbrado público, hornos de arco y soldadoras eléctricas.

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 ya que, al no contar con el neutro no tiene por donde fluir), resonancias en la red, reducción en la eficiencia de los transformadores y afectación en equipos electrónicos sensibles.

Dispositivos ferromagnéticos

Los dispositivos ferromagnéticos están constituidos por bobinas con núcleo de material ferromagnético. Estos núcleos, por su naturaleza, presentan características no lineales de histéresis y saturación, las cuales son responsables de la generación de armónicas en los sistemas eléctricos.

Transformadores

Un transformador consiste en un núcleo con un mínimo de dos embobinados. Además de su función de transferir energía, permite transformar voltajes, corrientes e impedancias. La densidad de flujo y la fuerza magnetizante del circuito magnético de los transformadores dependen de la permeabilidad magnética del núcleo. Dado que esta permeabilidad no es constante, la curva B-H no es lineal y presenta histéresis magnética.

Si se aplica una tensión de excitación senoidal en el devanado primario, el ciclo de histéresis del material ferromagnético distorsiona la corriente de excitación. Esta distorsión ocurre en cualquier condición de operación debido a la histéresis, mientras que la saturación solo afecta en condiciones específicas. A medida que el transformador se acerca a la saturación, el incremento de la corriente deja de traducirse en un aumento proporcional del flujo magnético, lo que genera armónicas, principalmente de tercer y quinto orden.

Convertidores estáticos de potencia

Los convertidores estáticos de potencia, como rectificadores e inversores, se utilizan para convertir la energía de una forma a otra. Estos dispositivos emplean semiconductores como transistores y tiristores, que operan mediante conmutación rápida (encendido y apagado a alta velocidad) para controlar la transferencia de energía.

Este proceso de conmutación introduce una característica no lineal en el sistema, lo que provoca la generación de armónicas. En un sistema ideal, la corriente o el voltaje tienen una forma de onda sinusoidal perfecta con una única frecuencia fundamental (60 Hz en el sistemas eléctrico de El Salvador). Sin embargo, la conmutación altera esta forma de onda, introduciendo variaciones abruptas y generando componentes de frecuencia múltiplos enteros de la fundamental (armónicas).

Factores como la velocidad de conmutación, la topología del convertidor, el tipo de carga conectada y los filtros utilizados influyen en la cantidad y el tipo de armónicas generadas.

Dispositivos que funcionan con arco eléctrico

Estos incluyen lámparas fluorescentes y de vapor de mercurio, soldadoras eléctricas y hornos de arco. Aunque los hornos de arco individualmente representan la mayor fuente de armónicas, el alumbrado fluorescente es la fuente más distribuida.

Las armónicas pueden provocar efectos adversos en la red eléctrica. No son generadas por las compañías distribuidoras de energía, sino por consumidores industriales con cargas no lineales. Si las armónicas son de alta magnitud, pueden inyectarse al sistema de potencia y afectar a otros usuarios.

1.3.5 Sobrevoltajes

El concepto de sobrevoltaje y su gestión mediante aislamiento y coordinación está regulado por la IEC 60071-1:

- Aislamiento y Coordinación: Selección de la rigidez dieléctrica de los equipos en relación con las tensiones presentes en el sistema, considerando el entorno de servicio y los dispositivos de protección disponibles.
- Sobrevoltaje: Cualquier voltaje línea a línea o línea a neutro cuyo valor pico exceda el máximo permitido para el equipo.

La correcta coordinación de aislamiento busca una protección eficiente para personas y equipos ante sobrevoltajes. Estos representan una de las principales causas de fallas en sistemas eléctricos y, debido a su naturaleza, son difíciles de caracterizar.

1.3.5.1 Causas de sobrevoltajes transitorios (Swells)

En sistemas de distribución, los sobrevoltajes transitorios tienen dos causas principales:

1. Conmutación de capacitores
2. Descargas atmosféricas

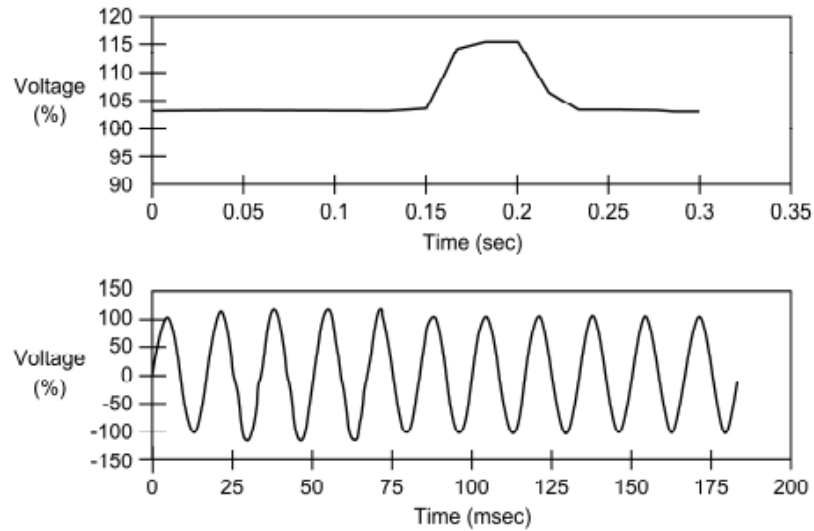


Figura 3. Sobretensión instantánea causada por una falla línea a tierra.

En la figura 3, se observa el aumento repentino y momentáneo de la tensión RMS, lo que se traduce como un Swell. En la gráfica de abajo, se observa el aumento en la magnitud de la onda sinusoidal de voltaje al momento de este evento.

También pueden generarse dentro de instalaciones de usuarios debido a fenómenos de conmutación en dispositivos electrónicos de potencia. Dependiendo de su origen, las sobretensiones pueden clasificarse en:

- Alta frecuencia: Causadas por conmutación de cargas o descargas atmosféricas.
- Frecuencia media: Relacionadas con la energización de capacitores.
- Baja frecuencia: Producidas por otros eventos en el sistema.

Conmutación de capacitores

Los bancos de capacitores son utilizados para corregir el factor de potencia, reducir pérdidas y estabilizar el voltaje en la red. Su operación puede ser constante o variar

según la carga presente en el sistema, utilizando diferentes esquemas de control (por tiempo, temperatura, voltaje, corriente o potencia reactiva).

Un indicador de problemas de calidad de energía causados por la conmutación de capacitores es la aparición recurrente de perturbaciones en horarios similares. En instalaciones industriales, los capacitores suelen conmutarse anticipadamente al incremento de carga al inicio de las horas laborales.

Descargas atmosféricas

Las descargas atmosféricas, ya sea en redes primarias o secundarias, generan sobrevoltajes de gran amplitud. Aunque las subestaciones y estructuras están conectadas a tierra, ciertos impulsos pueden transmitirse a través de los conductores y dañar los equipos.

Los conductores de tierra no son perfectos y presentan limitaciones al enfrentar impulsos transitorios, permitiendo que estos afecten distintos puntos del sistema. Uno de los principales problemas asociados a descargas atmosféricas es la elevación del potencial de tierra, lo que puede inducir voltajes peligrosos en el sistema, ocasionando daños en equipos industriales y electrodomésticos residenciales.

1.3.6 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.

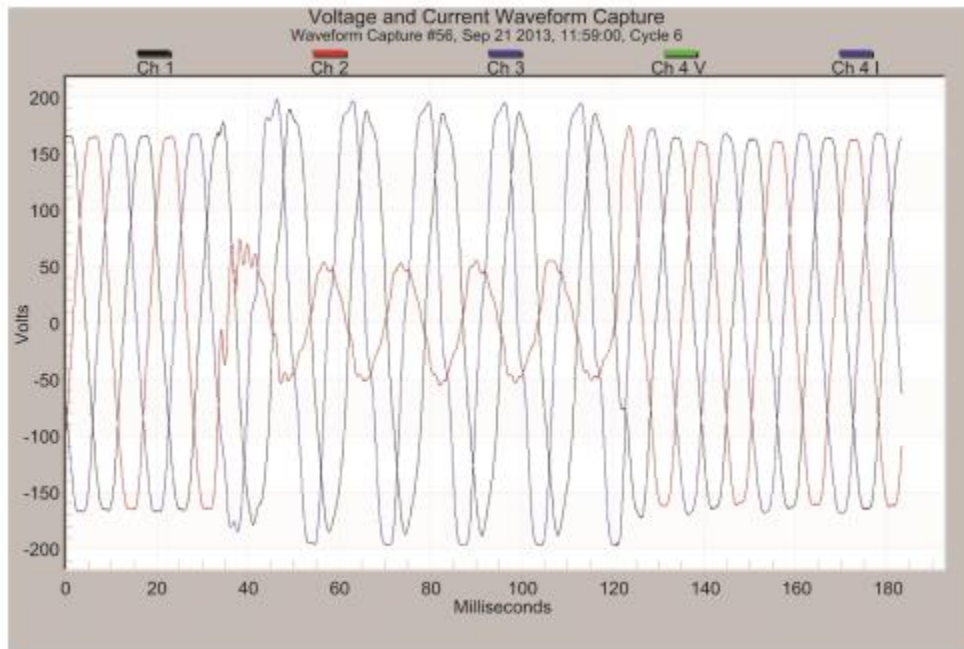


Figura 4. Hueco de tensión causado a partir de falla línea a tierra (IEEE, 2019).

En la figura 4 se observa el efecto de un hueco de tensión monofásico en la onda sinusoidal de voltaje, debido por una falla línea a tierra.

Un hueco de tensión o “Sag” se define como una reducción de corta duración en el nivel de tensión, generalmente dentro de un rango de 0.5 a 30 ciclos de la red eléctrica, lo que equivale a un tiempo de 8.3 ms a 500 ms en sistemas de 60 Hz y de 10 ms a 600 ms en sistemas de 50 Hz. 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.

1.3.6.1 Caracterización de los Huecos de Tensión

De acuerdo con la IEEE (2019), 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. 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.

1.3.6.2 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, resultando en 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.

1.3.6.3 Causas de los huecos de tensión

Los huecos de tensión pueden tener orígenes en distintos niveles del sistema eléctrico, por ejemplo:

Huecos de tensión originados en la red de distribución.

Son consecuencia de fallas en el sistema, como fallas trifásicas, bifásicas, bifásicas a tierra y, las más comunes, fallas monofásicas a tierra.

Se pueden generar también por la energización de grandes cargas o motores de alta potencia conectados a la misma red, provocando caídas de tensión que afectan a otros usuarios.

Huecos de tensión generados dentro de las instalaciones del usuario:

Equipos como hornos de arco eléctrico y motores de inducción pueden generar huecos de tensión al momento de su arranque.

Transformadores de gran capacidad también pueden contribuir a estos fenómenos debido a su alta corriente de energización.

Un caso particular es el arranque de motores de inducción, los cuales pueden demandar una corriente de arranque de hasta 600%-800% de su corriente nominal, generando una caída temporal de tensión que afecta a otros equipos conectados en la misma red. Este efecto es común en industrias como la cementera, donde los motores de alta potencia son esenciales en la producción.

1.3.6.4 Medidas de mitigación de huecos de tensión

Para reducir el impacto de los huecos de tensión, se pueden aplicar diversas estrategias:

Compensador Estático de VAR (SVC) para la Mitigación de Huecos de Tensión.

El SVC se configura como un sistema de compensación reactiva que regula la tensión de la red eléctrica. Esto se logra mediante el uso de conmutadores de reactancia, tales como bancos de capacitores y bobinas de reactancia variable, los cuales son controlados electrónicamente para proporcionar o absorber potencia reactiva en tiempo real, dependiendo de las condiciones de la red. Según IEEE 1266-2000 (Rogowska & Brezinski, 2000), el SVC es una herramienta clave para mejorar el rendimiento dinámico de los sistemas eléctricos, ajustando la potencia reactiva en función de las necesidades de la red.

Mitigación de Huecos de Tensión

Según la IEEE 1159-2019 (2019), los SVC son efectivos para mitigar los huecos de tensión, ya que permiten un ajuste rápido de la potencia reactiva, lo cual contribuye a estabilizar el voltaje y a reducir la magnitud y duración de estas caídas temporales de tensión.

El SVC contribuye a la mitigación de huecos de tensión a través de los siguientes mecanismos:

1. **Compensación dinámica:** El SVC ajusta de manera casi instantánea la potencia reactiva en la red, permitiendo que el voltaje se recupere rápidamente tras la caída. Este ajuste, que ocurre en milisegundos, contribuye a minimizar tanto la duración como la magnitud del hueco de tensión, tal como se detalla en IEEE 519-2014 (2014).
2. **Estabilización de la tensión:** En situaciones donde los huecos de tensión son causados por sobrecargas o fluctuaciones repentinas de carga, el SVC ofrece potencia reactiva de forma inmediata, estabilizando el sistema y evitando que el hueco se transforme en un apagón prolongado o una caída persistente de tensión, tal como se explica en IEEE 1547-2018 (2018).

Componentes del SVC

El SVC consta de varios componentes clave, entre los cuales se incluyen:

- **Bancos de capacitores:** Estos dispositivos proporcionan potencia reactiva para aumentar la tensión cuando la red lo requiere, y pueden ser conectados o desconectados según las condiciones de la red, siguiendo las directrices establecidas en IEEE 1100-2005 (2006).

- Reactores de inductancia variable: Absorben potencia reactiva cuando es necesario reducir la tensión o cuando la red tiene un exceso de energía reactiva.
- Controlador de SVC: Este sistema supervisa las condiciones y ajusta los componentes activos en función de las necesidades de la red, garantizando la estabilidad de la tensión en tiempo real.

Aplicaciones Típicas del SVC

El SVC es ampliamente utilizado en diversas aplicaciones, tales como:

- Redes de distribución eléctrica: Para mejorar la estabilidad de tensión y mitigar los huecos de tensión en áreas donde existen fluctuaciones importantes de carga, como se indica en IEEE 1159-2019 (2019).
- Industria: Para proteger equipos sensibles de caídas de tensión que pueden afectar el desempeño de sistemas electrónicos y otros dispositivos sensibles.
- Sistemas de transmisión eléctrica: Donde la compensación reactiva es esencial para mantener un voltaje adecuado y estable a lo largo de la red, tal como se menciona en IEEE 1266-2000 (Rogowska & Brezinski, 2000).

UPS Industriales para la Mitigación de Huecos de Tensión

En los sistemas de distribución eléctrica, los huecos de tensión son fenómenos comunes que afectan tanto a redes industriales como comerciales. Estos huecos pueden interrumpir el funcionamiento de equipos sensibles y causar daños a los sistemas de control y procesos críticos. Los UPS industriales (Uninterruptible Power Supplies o Sistemas de Alimentación Ininterrumpida) se utilizan para proporcionar

una fuente continua de energía durante estos huecos de tensión, evitando interrupciones en la operación de los equipos.

Funcionamiento de los UPS Industriales

Un UPS industrial es un dispositivo diseñado para proporcionar energía eléctrica continua cuando se produce una interrupción temporal en el suministro de la red. Esto se logra a través de una batería interna o un generador de respaldo, que entra en funcionamiento de manera inmediata cuando se detecta una caída de tensión o pérdida de energía en la red eléctrica. Según IEEE 1100-2005 (2006), los UPS industriales están diseñados para mantener la operación continua de los equipos críticos sin que se vea afectada su capacidad operativa.

Mitigación de Huecos de Tensión con UPS Industriales

Cuando se produce un hueco de tensión, el voltaje en la red disminuye temporalmente, lo que puede afectar el funcionamiento de equipos. Los UPS industriales actúan como una solución efectiva para mitigar los efectos de los huecos de tensión, proporcionando energía de respaldo hasta que se restablezca el suministro eléctrico normal. Según IEEE 1159-2019 (2019), los UPS son sistemas de respaldo esenciales que permiten una transición sin interrupciones, evitando que los procesos industriales se vean comprometidos durante estos eventos transitorios. Los UPS contribuyen a la mitigación de huecos de tensión de la siguiente manera:

Alimentación ininterrumpida: Cuando ocurre un hueco de tensión, el UPS cambia automáticamente a la batería interna, proporcionando energía a los equipos conectados y evitando cualquier interrupción. Este tiempo de conmutación es muy breve, lo que garantiza la continuidad de las operaciones industriales, tal como se menciona en IEEE 519-2014 (2014).

Estabilización de la tensión: Algunos modelos de UPS industriales, como los de tipo online o *doble conversión*, no solo proporcionan energía de respaldo, sino que también estabilizan el voltaje, eliminando las fluctuaciones de tensión causadas por huecos o picos en la red, como se explica en IEEE 1547-2018 (2018). Esto es crucial para proteger equipos sensibles y mantener la calidad de energía de la planta industrial.

Componentes de un UPS Industrial

Los UPS industriales constan de varios componentes clave que permiten su funcionamiento continuo:

- **Batería interna:** Suministra energía en caso de fallos de la red, permitiendo que los equipos continúen operando sin interrupciones. Según IEEE 1100-2005 (2006), la batería es uno de los componentes críticos que define la autonomía del UPS.
- **Convertidor de energía:** Convierte la energía de la batería de corriente continua (DC) en corriente alterna (AC) para alimentar los equipos.
- **Controlador:** Supervisa y regula el sistema de UPS, asegurando que la conmutación entre la fuente principal y la fuente de respaldo ocurra sin problemas.

Aplicaciones Típicas de los UPS Industriales

Los UPS industriales son utilizados en una variedad de aplicaciones, tales como:

- **Industria de procesos:** Para mantener el funcionamiento de sistemas de control, maquinaria y equipos sensibles a la variación de voltaje durante huecos de tensión.

- Sistemas de telecomunicaciones y redes: Para asegurar que las operaciones de comunicación no se vean interrumpidas por fallos en el suministro eléctrico.
- Plantas de fabricación y automatización: Donde los equipos industriales no pueden permitirse tiempos de inactividad debido a la caída de tensión.

Tipos de UPS Industriales

Existen varios tipos de UPS industriales, cada uno con sus características específicas para aplicaciones particulares:

- UPS online (doble conversión): Proporciona la mejor calidad de energía, eliminando la distorsión armónica y las fluctuaciones de voltaje. Es especialmente útil en entornos donde los equipos sensibles están operando.
- UPS de standby: Son más económicos y entran en funcionamiento solo cuando se detecta una caída de tensión, lo que hace que su tiempo de conmutación sea un poco más largo en comparación con los UPS online.
- UPS de doble entrada: Utiliza dos fuentes de alimentación para proporcionar mayor seguridad y fiabilidad en los sistemas industriales, como se menciona en IEEE 1547-2018 (2018).

Mitigación de Huecos de Tensión con el Dispositivo SAG Fighter

Los huecos de tensión (sags) son fluctuaciones de voltaje que pueden afectar la operación de equipos sensibles en un sistema eléctrico, especialmente en entornos industriales. Para mitigar estos eventos, se han desarrollado dispositivos específicos como el SAG Fighter, los cuales están diseñados para proporcionar una respuesta rápida a estas caídas de tensión y evitar que interfieran con la operación de los equipos.

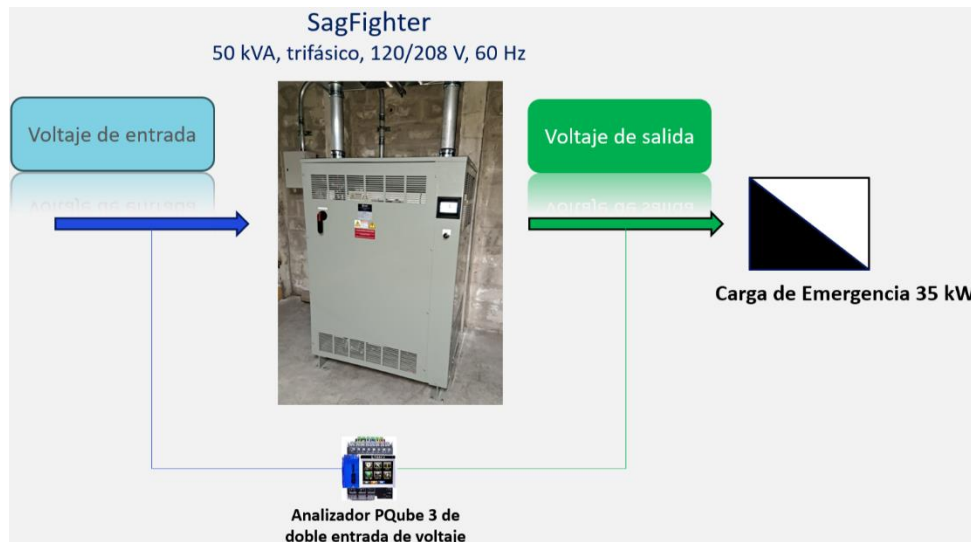


Figura 5. Diagrama de conexión del SagFighter instalado en un edificio de servicios corporativos.

En la figura 5 se observa como el mitigador de huecos de tensión es instalado, el cual es conectado al voltaje de entrada (servido por la empresa distribuidora de energía) y a la salida es conectada la carga del cliente.

El SAG Fighter es un dispositivo especializado en la mitigación de huecos de tensión que corrige las caídas de voltaje transitorias en tiempo real, evitando que los equipos industriales y electrónicos sufran interrupciones o daños por fluctuaciones de voltaje. Este dispositivo se activa inmediatamente cuando se detecta una caída de tensión, proporcionando energía adicional para estabilizar el sistema eléctrico y mantener el voltaje dentro de los niveles necesarios para el funcionamiento adecuado de los equipos. A diferencia de los UPS, este equipo no utiliza baterías o almacenamiento de baterías para su funcionamiento.

Funcionamiento del SAG Fighter

El SAG Fighter consiste en un transformador trifásico con cada uno de sus embobinados secundarios conectados en serie entre la fuente y la carga. La corriente de la carga fluye a través de los embobinados del transformador mientras

que la unidad opera en un estado de “monitoreo” con los embobinados primarios del transformador cortocircuitados a través de interruptores SRC. Estos interruptores permiten una conmutación rápida y controlada.

El SAG Fighter monitorea de forma continua la forma de onda de voltaje de entrada en busca de cualquier evento de tensión de un voltaje trifásico balanceado. Al momento de sentir una desviación de esta, el equipo activa un circuito inversor para aplicar un voltaje inducido a los devanados primarios del transformador conectado en serie. Este voltaje se sintetiza con una magnitud, forma y ángulo de fase de manera que, cuando se suma en serie con el voltaje de entrada, se obtiene un voltaje trifásico balanceado. Cuando el evento ha pasado y ya no existe un voltaje de entrada atípico, el circuito inversor se desconecta y la unidad regresa al modo de monitoreo.

Características Principales del SAG Fighter

Respuesta rápida: El SAG Fighter está diseñado para reaccionar de manera instantánea ante un hueco de tensión, proporcionando energía adicional para estabilizar el sistema eléctrico y evitar la afectación de equipos sensibles.

Compensación de tensión breve: Es particularmente eficaz en la corrección de huecos de tensión de corta duración, que son comunes en las redes eléctricas, y que podrían afectar la producción o el rendimiento de equipos electrónicos si no se mitigan a tiempo.

Protección de equipos sensibles: El dispositivo asegura que los equipos electrónicos y los sistemas de control, como los PLC (Controladores Lógicos Programables) y otros equipos de automatización, sigan funcionando correctamente incluso durante eventos de huecos de tensión.

Estabilización continua del voltaje: El SAG Fighter no solo mitiga los huecos de tensión, sino que también ayuda a estabilizar el voltaje de la red, eliminando otras variaciones o fluctuaciones que puedan ser perjudiciales para el funcionamiento de los sistemas eléctricos industriales.

Instalación sencilla: Este dispositivo puede ser integrado fácilmente en sistemas eléctricos industriales existentes sin la necesidad de una modificación significativa en la infraestructura, lo que facilita su implementación.

Mantenimientos: Debido a que el SagFighter no requiere del uso de baterías para su funcionamiento, no existe la necesidad de realizar cambios por desgaste de ellas. Este equipo no tiene un programa de mantenimiento a parte de la inspección y limpieza rutinarias.

Ventajas del Uso del SAG Fighter

El SAG Fighter presenta varias ventajas clave para la industria, que van desde la protección de los equipos hasta la mejora de la continuidad operativa:

- Protección de los equipos: Al corregir los huecos de tensión de manera inmediata, el SAG Fighter protege a los equipos sensibles y evita daños en componentes electrónicos y sistemas de control automatizados, que son fundamentales para el proceso de producción.
- Reducción de tiempos de inactividad: La capacidad del SAG Fighter para restablecer la tensión rápidamente minimiza los tiempos de inactividad que podrían resultar de las fluctuaciones de voltaje, lo cual es crucial en ambientes industriales con procesos continuos.

- Mantenimiento bajo: En comparación con otros dispositivos de mitigación de tensiones, el SAG Fighter requiere de un mantenimiento mínimo, lo que lo convierte en una opción económica y de bajo costo operativo a largo plazo.

Aplicaciones del SAG Fighter

El SAG Fighter se utiliza principalmente en entornos industriales donde los huecos de tensión pueden interrumpir los procesos de producción o afectar el funcionamiento de equipos sensibles. Entre las aplicaciones más comunes se incluyen:

- Plantas de fabricación: Para proteger maquinaria y equipos electrónicos sensibles, como robots industriales y controladores automáticos, de las caídas de tensión que pueden dañar los sistemas.
- Centros de datos: Para mantener la continuidad del servicio en los servidores y otros equipos de TI que requieren un suministro eléctrico estable.
- Instalaciones de procesamiento de datos y telecomunicaciones: En lugares donde la comunicación y el procesamiento de información son esenciales, el SAG Fighter garantiza que los sistemas sigan funcionando correctamente sin interrupciones.

A pesar de que todas las soluciones propuestas presentan potencial para mitigar los huecos de tensión, se ha decidido enfocar el estudio en el SAG Fighter. Esta elección se fundamenta en la disponibilidad de datos previos del equipo, el acceso a información técnica confiable y su aplicación comprobada en entornos industriales, donde los huecos de tensión representan un problema recurrente. No obstante, esta selección no implica la descalificación de las demás alternativas, las

cuales también podrían resultar viables dependiendo del contexto específico de aplicación.

CAPÍTULO DOS: METODOLOGÍA

Este estudio tiene como objetivo analizar la calidad de energía en plantas industriales productoras de cartón y bebidas embotelladas, donde la presencia de huecos de tensión afecta la producción. Para ello, se implementó un proceso estructurado de medición, extracción y análisis de datos utilizando analizadores de calidad de energía PQube 3 de la marca Powerside.

2.1 Planificación de la medición

Antes de la solicitud de recolección de datos, fue necesario definir y estructurar el proceso de medición para garantizar que los datos obtenidos sean representativos y confiables.

Duración del monitoreo

Se realizaron mediciones continua durante seis meses, asegurando que se capturen eventos eléctricos a lo largo de diversas condiciones operativas dentro de las plantas.

Parámetros eléctricos monitoreados

Se midieron los siguientes parámetros con intervalos de 5 minutos:

- Tensión de alimentación (valores RMS de fase y línea).
- Tasa de distorsión armónica total (THD) de tensión y corriente.
- Flicker de tensión (Pst).
- Eventos de huecos de tensión (magnitud y duración).

2.2 Instalación de equipos de medición

Los analizadores PQube 3 se encuentran instalados en puntos estratégicos dentro de cada planta industrial. La selección de estos puntos dependerá de factores como la distribución eléctrica, presencia de cargas sensibles y datos históricos de perturbaciones eléctricas.

Puntos de instalación del equipo

El equipo se encuentra instalado en el punto de medición primaria de los clientes, donde se conectaron las sondas de voltaje y corriente en las entradas del sistema. Así mismo los equipos se encuentran programados de acuerdo con la tensión nominal del servicio eléctrico y la configuración de conexión de los potenciales de voltaje y corriente. Estos clientes tienen la característica de contar con equipos industriales con electrónica sensible que pueden ser afectados por la presencia de los huecos de tensión y, por lo tanto, pueden afectar su producción.

2.3 Extracción y procesamiento de datos

Una vez finalizado el período de medición, se procedió con la extracción y organización de los datos obtenidos.

Recuperación de datos desde la nube

Los datos fueron descargados desde la plataforma en la nube donde los PQube 3 almacenan la información.

Organización de datos de huecos de tensión

Los huecos de tensión fueron extraídos desde tablas generadas por el PQube 3 y reorganizados en un formato estándar con las siguientes columnas:

- Fecha (dd/mm/aaaa)
- Hora (hh:mm:ss)
- Magnitud del hueco (% respecto a la tensión nominal)
- Duración del hueco (ms o ciclos)

2.4 Análisis de la calidad de energía en los usuarios definidos

Gracias a la generación automática de gráficos y estadísticas mensuales de las mediciones realizadas por el PQube 3, podemos realizar análisis mensuales, Sin embargo, al decidir un periodo de medición de 6 meses y evaluar la calidad de la energía en este periodo, esta generación de gráficos nos resulta poco útil. Así mismo, el volumen de los datos de las mediciones superaba la capacidad de herramientas ofimáticas convencionales.

Debido a esta adversidad, se decidió diseñar un script usando el lenguaje de Python para poder conglomerar todas las estadísticas mensuales y obtener resultados precisos de las mediciones.

Este script toma como referencia el Acuerdo 38-E-2015 de la Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones (SIGET) sobre las *Normas de Calidad del Servicio de los Sistemas de Distribución*, en la cual se detallan los límites que no deben de sobrepasar ciertos parámetros, para comprobar que el cliente dispone de una calidad de energía adecuada.

El script propone una alternativa eficiente y automatizada para obtener resultados de las mediciones, centrándose en los voltajes mínimos, máximos y promedios, los promedios de la distorsión armónica de voltaje y corriente, el nivel de flicker de corta duración y la clasificación y visualización de los huecos de tensión críticos y no críticos.

Como punto de partida, se definieron las librerías a utilizar y estas son importadas al IDE (para nuestro caso se decidió Visual Studio Code). Las librerías utilizadas para el desarrollo del script son:

Pandas: Es una herramienta de análisis y manipulación de datos de código abierto rápida, potente, flexible y fácil de usar, construido sobre el lenguaje de programación Python. Debido a la inmensidad de los datos que se disponen para el análisis, la librería *pandas* ofrece una facilidad en el cálculo de promedios, indicadores técnicos como lo son el FEBNoPER (SIGET, s.f.) y demás.

Numpy: Es un proyecto de código abierto que permite la computación numérica con Python. De forma muy resumida, es como utilizar Matlab en Python. Ayuda al momento de realizar condiciones similares al “*If*” de Excel así como generar un conjunto de números equidistantes dentro de un rango específico para la generación de curvas normales.

Matplotlib: Es una biblioteca completa para crear visualizaciones estáticas, animadas e interactivas en Python. Debido a que visualizar los datos procesados es parte importante del análisis de datos, la librería *matplotlib* es útil para este fin.

Tkinter: En la biblioteca Tkinter de Python, *filedialog* se utiliza para abrir un cuadro de diálogo de archivos que permite a los usuarios seleccionar un archivo. Esta función nos ayuda para la selección de directorios y archivos, facilitando el desarrollo del código y ofreciendo interacción entre código – usuario.

Os: Este módulo provee una manera versátil de usar funcionalidades dependientes del sistema operativo. Específicamente utilizamos la función *listdir*, para que a partir de una ruta podamos generar un objeto iterable y concatenar archivos.

Pathlib: Este módulo ofrece clases que representan rutas del sistema de archivos con semántica apropiada para diferentes sistemas operativos. Debido a que los usuarios no solo trabajan en Windows (sistema operativo donde se ha diseñado el código), se decidió utilizar la librería Pathlib (específicamente la función *Path*) para el manejo de rutas de directorio.

2.5 Explicación del funcionamiento del código

2.5.1 Selección de Archivos de Entrada

El programa inicia solicitando al usuario la selección de los archivos de entrada mediante diálogos gráficos interactivos. En primer lugar, se pide un directorio que contiene múltiples archivos CSV con las mediciones de calidad de energía, correspondientes a las lecturas del equipo PQube. En segundo lugar, se solicita un archivo de texto que registra los eventos de huecos de tensión, separados por el carácter PIPE (“|”). Esta interfaz permite una interacción intuitiva y asegura que los datos sean cargados desde las ubicaciones correctas.

2.5.2 Concatenación de Mediciones

Para consolidar las mediciones en un único conjunto de datos, se inicializa un DataFrame vacío denominado `df_concatenado`. Mediante un bucle iterativo, se recorre cada archivo CSV en el directorio seleccionado, leyéndose cada uno como un DataFrame individual. Durante la lectura, se especifica que los encabezados se encuentran en la quinta fila, y se configuran parámetros para manejar formatos mixtos de fecha y evitar errores de parsing, garantizando robustez en el procesamiento. Los DataFrames individuales se concatenan en `df_concatenado`, ignorando los índices originales para formar una serie temporal continua. Posteriormente, la columna 'Start Date and Time' se convierte a formato de fecha y hora, permitiendo calcular las fechas de inicio y fin del periodo de medición, las cuales se utilizan como referencia en el análisis.

2.5.3 Análisis de Huecos de Tensión

El archivo de huecos de tensión se procesa en un DataFrame (`df_sags`) y se somete a un análisis detallado para clasificar los eventos según su criticidad:

1. **Normalización:** La columna 'Magnitud' se divide entre 100 para expresarla en formato decimal.
2. **Definición de Criterios:** Se establecen parámetros para determinar si un hueco de tensión es crítico, basándose en su duración (en segundos) y magnitud (en porcentaje). Se calculan columnas como 'Area', 'm=' y 'b=' para definir una frontera lineal, y se especifican cinco áreas críticas (Area 1 a Area 5) junto con una condición de pérdida de carga mediante expresiones lógicas booleanas.

3. **Clasificación:** Se genera una columna 'y=' que combina las condiciones críticas, y mediante una función condicional, se asigna 'Sí' o 'No' a la columna 'Hueco Crítico' según corresponda. Finalmente, se crean dos subconjuntos: df_sags_criticos (huecos críticos) y df_sags_no_criticos (huecos no críticos), los cuales se utilizan en visualizaciones posteriores.

2.5.4 Configuración de Urbanidad y Niveles de Tensión

El programa solicita al usuario tres parámetros mediante entrada por consola:

- Voltaje nominal en kilovoltios (kV), ingresado como número flotante.
- Nivel de tensión, clasificado como baja tensión (BT, $< 600\text{ V}$) o media tensión (MT, $600\text{ V} < V < 115\text{ kV}$).
- Urbanidad, clasificada como urbana (U), rural (R) o aislada (A).

Con base en estas entradas, se determinan los límites inferior y superior de tensión permisibles según las condiciones del usuario. Por ejemplo, en baja tensión rural, los límites se establecen en 92% y 108% del voltaje nominal, mientras que, en media tensión urbana, se ajustan a 94% y 106%. Además, se definen límites extremos del 70% y 130% del voltaje nominal para invalidar registros, ya que estos no son considerados en el cálculo del FEBNoPER. Estos valores se alinean con lo establecido en el Acuerdo 38-E-2015 (SIGET, s.f.) y permiten contextualizar los resultados.

2.5.5 Cálculo de Parámetros de Calidad de Energía

El análisis de las mediciones se organiza en varios cálculos clave:

1. **FEBNoPER:** Se calcula el Frecuencia equivalente fuera de las tolerancias establecidas. Para ello, se determinan las desviaciones relativas de cada fase (D1, D2, D3) respecto al voltaje nominal, se identifica la desviación máxima y se evalúa cuántos registros exceden los límites establecidos. Este valor no debe superar el 5% (SIGET, s.f.).
2. **Estadísticas de Tensión y Corriente:** Se obtienen el mínimo, máximo, promedio y mediana de la tensión RMS promedio entre fases, así como el promedio de la corriente RMS. También se calculan desviaciones estándar para su uso en gráficos.
3. **Distorsión Armónica:** Se determinan los promedios de la distorsión armónica total de tensión (VTHD) y corriente (ITHD), junto con tasas de excedencia basadas en umbrales de 8% para VTHD y 20% para ITHD (SIGET, s.f.).
4. **Frecuencia y Flicker:** Se calcula la frecuencia promedio del periodo y, para el flicker de corta duración (Pst), se obtienen el promedio y el percentil 95 como indicadores de calidad, y este se evalúa respecto al límite establecido de 1.0 (SIGET, s.f.).

2.5.6 Visualización de Resultados

El programa genera una serie de gráficos para facilitar la interpretación de los datos:

1. **Histogramas con Curvas Normales:** Se elaboran histogramas de tensión, VTHD, ITHD y flicker, superponiendo curvas normales calculadas con las medias y desviaciones estándar correspondientes. Los datos de tensión se filtran para excluir valores atípicos inferiores al 89.56% del voltaje nominal para darle una mejor visibilidad al visual.
2. **Perfiles Temporales:** Se grafican las tensiones RMS por fase, VTHD, ITHD y flicker a lo largo del tiempo, incluyendo líneas horizontales que indican los límites normativos (e.g., 8% para VTHD, 1 para flicker).
3. **Curvas ITIC:** Se representan los huecos de tensión críticos y no críticos en diagramas de dispersión sobre la curva ITIC, utilizando una escala logarítmica en el eje de duración para destacar la distribución de eventos.

Todos los gráficos incluyen rejillas (“grids”), etiquetas y leyendas para mejorar su legibilidad, y se despliegan mediante una instrucción final que muestra las figuras generadas.

CAPÍTULO TRES: RESULTADOS

En la actualidad, debido a la cantidad de procesos automatizados que están presentes en la industria, se ve involucrada nueva maquinaria con electrónica sensible en los procesos industriales, siendo estas el corazón de la producción en estas industrias.

En la siguiente sección, se lleva a cabo un análisis de calidad de energía para dos empresas. La primera corresponde a una empresa embotelladora mientras que la segunda corresponde a una empresa cartonera. En ambas, la operación constante y fiable de las maquinarias involucradas en los procesos industriales es fundamental, ya que alguna perturbación puede afectar desde el desgaste y reducción de la vida útil hasta la completa desconexión de la máquina, significando pérdidas económicas en los usuarios industriales.

3.1 Normativa aplicable al estudio

La normativa aplicable a este análisis es el acuerdo 38-E-2015 de la SIGET (SIGET, s.f.), para el estudio de la regulación de tensión y las perturbaciones eléctricas (armónicos y flicker).

Acuerdo No. 38-E-2015 de la SIGET “Normas de Calidad del Servicio de los Sistemas de Distribución”

La SIGET propuso el acuerdo 38-E-2015 para regular los índices e indicadores de referencia para calificar la calidad con la que las distribuidoras de energía eléctrica suministran los servicios de estas a los usuarios de la red de distribución, estableciendo tolerancias permisibles, métodos de control y sus debidas compensaciones.

De esta se destacan 3 calidades de las cuales solo nos interesa la calidad del producto técnico suministrado, que implica los niveles de tensión, las perturbaciones en la onda de voltaje (siendo estas flicker y las armónicas de voltaje y corriente) y la incidencia del usuario en la calidad.

Dentro de la misma norma se destacan algunas definiciones, las cuales nos ayudarán a comprender la terminología cuando se haga el análisis.

Distorsión Armónica: Es la distorsión de la onda senoidal de corriente o de tensión eléctrica de frecuencia nominal, ocasionada por la presencia de señales eléctricas senoidales de frecuencias diferentes y múltiples de dicha frecuencia nominal.

Flicker: Es una variación rápida y cíclica de la tensión, que causa una fluctuación correspondiente en la luminosidad de las lámparas a una frecuencia detectable por el ojo humano.

Interrupción: Se considerará como interrupción toda falta de suministro de energía eléctrica en el punto de entrega al usuario.

Interrupción Momentánea: Son aquellas interrupciones que tienen una duración limitada hasta de tres (3) minutos, el cual es el tiempo requerido para restablecer los dispositivos de control y protección.

Interrupción Sostenida: Cualquier interrupción no clasificada como momentánea. La normativa aplicable para este estudio de calidad de energía son los acuerdos 38-E-2015. Este acuerdo hace énfasis en Las Normas de Calidad del Servicio de Los Sistemas de Distribución.

Regulación de Tensión

Según el artículo 23 del acuerdo 38-E-2015 de la SIGET, los niveles máximos y mínimos de tensión varían según la zona de servicio (si se encuentra en una zona rural, urbana o aislada) y del nivel de tensión nominal al cual el punto a medir está siendo servido en el punto de suministro o entrega al usuario. Estos límites admisibles se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 1. Niveles máximos y mínimos de tensión según la zona de servicio.

Nivel de tensión	Densidad de carga alta	ΔV_k	
		Densidad de carga baja	Aislado
Baja Tensión (≤ 600 V)	$\pm 7\%$	$\pm 8\%$	$\pm 8.5\%$
Media Tensión (600 V < V < 115 kV)	$\pm 6\%$	$\pm 7\%$	$\pm 8.5\%$

Armónicas

De acuerdo con lo referente del acuerdo 38-E-2015 sobre las armónicas de tensión y corriente se establecen los requisitos a cumplir por parte de las Distribuidoras de Energía Eléctrica y del cliente final.

Armónicas de Tensión

Según el artículo 45 del acuerdo anteriormente mencionado, la empresa distribuidora deberá limitar la distorsión armónica de tensión en los niveles de baja y media tensión a fin de no sobrepasar los valores especificados en la tabla siguiente.

Tabla 2. Límites de distorsión armónica individual y total de voltaje. (SIGET, s.f.)

Órdenes impares no múltiplos de 3 (n)	Tasa de distorsión individual (%)	Órdenes impares múltiplos de 3 (n)	Tasa de distorsión individual (%)	Órdenes pares (n)	Tasa de distorsión individual (%)
5	6.0	3	5.0	2	2.0
7	5.0	9	1.5	4	1.0
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3.0	21	0.2	8	0.5
17	2.0	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2+1.3*25/n$				

LÍMITE DE LA TASA DE DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL=8 %

Armónicas de Corriente

Según el artículo 50 del acuerdo 38-E-2015, los indicadores y límites de la distorsión armónica de la corriente de carga originada en las instalaciones internas de un usuario final dependerán de la potencia registrada por fase en cada intervalo de la medición realizada en el punto de entrega del usuario y del orden de la armónica correspondiente y no deberán sobrepasar los límites indicados en la tabla siguiente.

Flicker

Según el artículo 55 del acuerdo 38-E-2015, el índice de Flicker generado por el usuario se determina por el índice de severidad de Flicker de corto plazo (Pst) medido en cada fase del punto de entrega del usuario final, cumpliendo con las especificaciones de la norma IEC 61000-4-15 o la que la sustituya.

A continuación, se presentan los valores del índice de severidad de Flicker (Pst) que no deben ser excedidos por el usuario.

Tabla 3. Límites de distorsión armónica individual y total de corriente. (SIGET, s.f.)

Orden de la armónica (n)	Potencia < 3.5 kW	
	Intensidad de la Componente Armónica (amperios)	Potencia ≥ 3.5 Kw Distorsión Armónica Individual de Corriente (%)
Órdenes impares no múltiplos de 3	5	2.28
	7	1.54
	11	0.66
	13	0.42
	17	0.26
	19	0.24
	23	0.20
	25	0.18
>25	4.5/n	0.2+0.8*25/n
Órdenes impares múltiplos de 3	3	4.60
	9	0.80
	15	0.30
	21	0.21
	>21	4.5/n
Órdenes pares	2	2.16
	4	0.86
	6	0.60
	8	0.46
	10	0.37
	12	0.31
>12	3.68/n	
Distorsión Armónica Total de Corriente (%)		--
		20

Tabla 4. Limite Flicker. (SIGET, s.f.)

Carga (SI) kW	Pst
Tensión: (≤ 600 V)	
SI ≤ 20	1.00
20 < SI ≤ 30	1.26
30 < SI ≤ 50	1.58
SI > 50	1.86
Tensión: (600 < V < 115 kV)	
SI / Scc ≤ 0.005	0.37
0.005 < SI / Scc ≤ 0.02	0.58
0.02 < SI / Scc ≤ 0.04	0.74
SI / Scc > 0.04	0.80

3.2 Equipos analizadores de calidad de energía utilizados

Para el análisis, se instaló un analizador de calidad de energía el cual cumple con los requerimientos del ente regulador (SIGET) en el punto de acople común entre la distribuidora y las empresas.

Se detalla a continuación las características generales del equipo de medición utilizado.

Tabla 5. Características generales de los equipos de medición utilizados.

Empresa cartonera	Empresa embotelladora
Marca analizador: Powerside	Marca analizador: Powerside
Modelo: PQube 3	Modelo: PQube 3
Número de serie: P3005189	Número de serie: P3005131

El periodo de medición fue de 6 meses, desde junio a diciembre de 2024. Debido a la inmensidad de los datos y a la facilidad de la generación de gráficos automáticos de los analizadores PQube 3, se han separado los datos de forma mensual. Es decir, se tienen seis periodos por empresa.

Como punto a consideración, debido a que el equipo analizador mide de forma continua y genera de forma mensual reportes y gráficos, se ha decidido recopilar estos datos utilizando Python, para facilitar el análisis. El objetivo de trabajar con Python es poder analizar una gran cantidad de meses de medición de una forma automatizada y más eficiente.

Los valores mínimos, máximos y promedios que obtendremos utilizando esta metodología de análisis diferirán de los mínimos, máximos y promedios que aparecerán en las gráficas, ya que se busca recopilar los 6 meses de medición en

un solo resultado. Sin embargo, por la facilidad de la generación de gráficos que ofrecen los PQube, se mostrarán las figuras correspondientes por cada periodo.

3.3 Empresa cartonera

Como primer punto de partida, debemos de tomar en cuenta la información disponible del cliente. En los datos de tensión tenemos un voltaje línea a neutro de 13.2 kV RMS y un voltaje línea a línea de 22.9 kV. A partir de estos datos, podemos definir los límites superiores e inferiores para el monitoreo de la regulación de tensión.

Según la tabla 1, los límites mínimos y máximos son establecidos de acuerdo con el área de servicio en la que se encuentre el cliente. Por lo tanto, debido a que este cliente se encuentra en una zona urbana y la tensión servida al cliente es de 13.2 kV (cliente de media tensión), el límite mínimo y máximo de tensión será de $\pm 6\%$.

Es decir:

Definición de límite inferior

$$V_{min} = V_{nominal} \times 0.94$$

$$V_{min} = 13,200 V \times 0.94$$

$$V_{min} = 12,408 V = 12.41 kV$$

Definición de límite superior

$$V_{max} = V_{nominal} \times 1.06$$

$$V_{max} = 13,200 V \times 1.06$$

$$V_{max} = 13,992 V = 13.99 kV$$

Se estará usando como voltaje mínimo 12,41 kV y como voltaje máximo 13.99 kV.

Una vez definidos los límites de tensión y tomando en cuenta los límites de armónicos y flicker de las tablas tabla 2, tabla 3 y tabla 4, procedemos con el análisis punto por punto. Para el análisis de huecos de tensión, se usará la curva ITIC.

3.3.1 Regulación de tensión

El perfil de tensión durante el periodo de medición puede apreciarse en la figura, en ella están plasmados los valores RMS de voltaje medidos. Los valores para cada una de las fases se encuentran dentro del rango permitido, sin registros fuera de los límites establecidos.

Tenemos un valor promedio de tensión rms de 13.07 kV, el cual está dentro del límite establecido. Calculando el valor de la mediana a partir del método “.median()” de la librería pandas, obtenemos el mismo valor que el valor promedio (13.07 kV). Por lo tanto, los datos tienden a comportarse con una distribución Gaussiana.

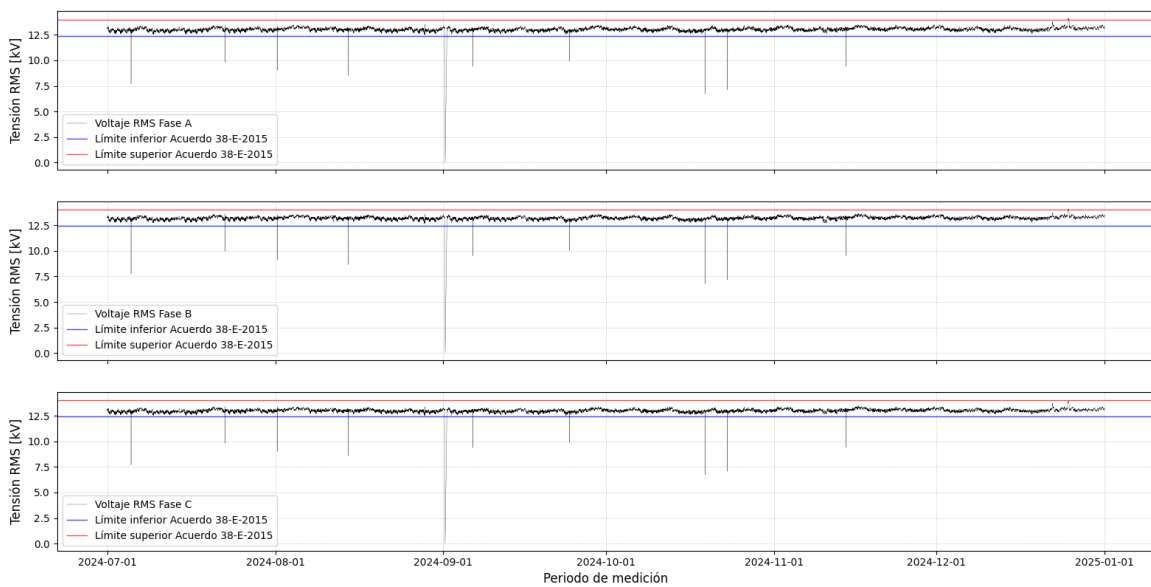


Figura 6. Perfil de tensión RMS en las tres fases de la cartonera.

Se puede observar en el perfil de tensión que el circuito al que está conectado la empresa 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, s.f.).

Se observa en el perfil de tensión que la mayoría de los eventos se presentaron entre el mes de julio 2024 a octubre 2024, que coincide con los últimos cuatro meses de la época lluviosa en El Salvador. Esto podría indicar que ocurrieron diversos tipos de fallas momentáneas en la red de distribución que pudieron dar lugar a estos eventos.

Los datos indican caídas súbitas de tensión a lo largo del periodo de medición sin llegar a un nivel menor a 0.1 p.u. de la tensión nominal, estando por debajo del límite inferior de 12.41 kV. Por lo tanto, se concluye que estas caídas súbitas de tensión se deben a interrupciones momentáneas (menores a 3 minutos).

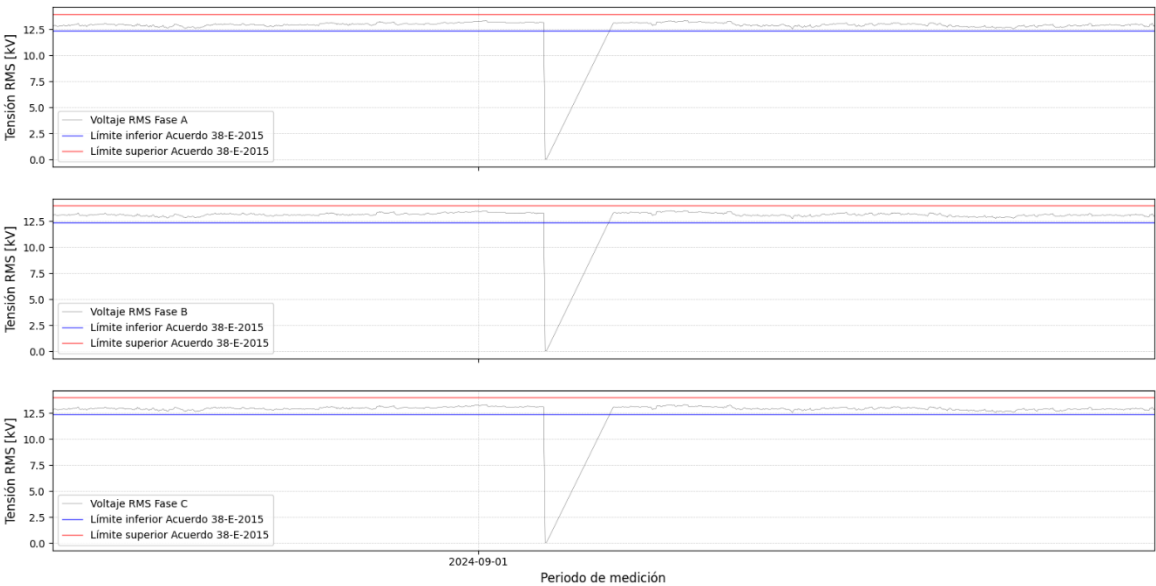


Figura 7. Interrupción en la cartonera del 1º de septiembre de 2024.

En un día en específico (1 de septiembre de 2024) el promedio de la tensión cayó a 0 V, significando o una interrupción sostenida de una duración mayor a 5 minutos o una desconexión momentánea del equipo. No obstante, no es posible obtener asociarlo con una causa específica a partir de la información que se tiene.

3.3.2 Armónicos

3.3.2.1 Tasa de distorsión armónica de voltaje.

La tasa de distorsión armónica de voltaje o comúnmente conocida como THD por sus siglas en inglés, es la distorsión de la onda sinusoidal de tensión a la frecuencia nominal (60 Hz). El THD o VDAT según la normativa SIGET (SIGET, s.f.) indica el grado de contaminación armónica total que existe en la señal de voltaje.

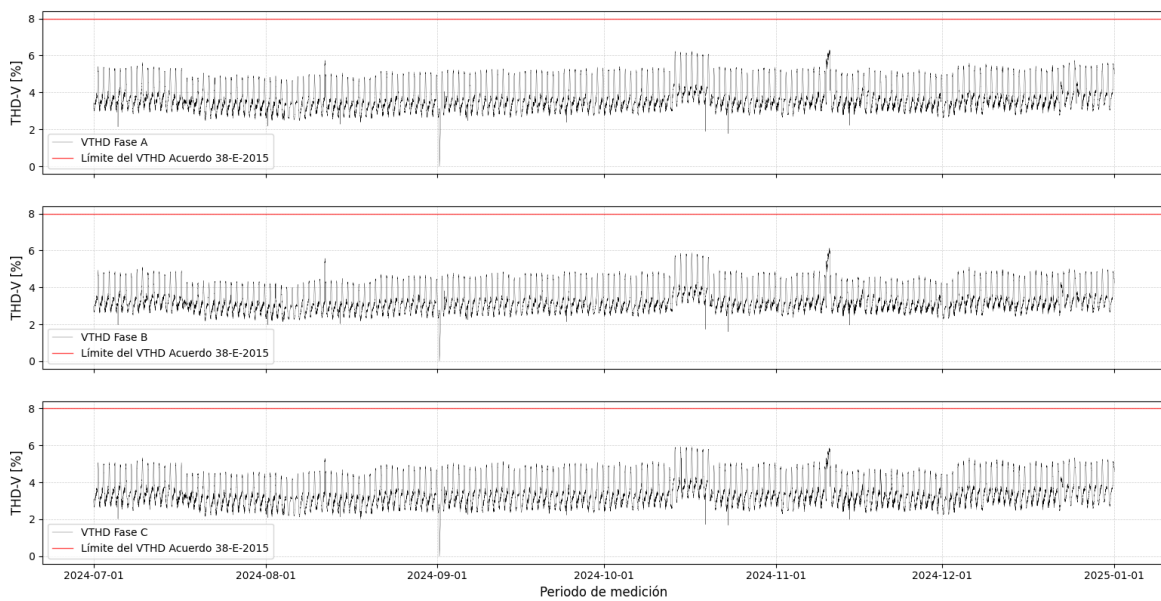


Figura 8. Tasa de Distorsión Armónica (THDV) de la cartonera.

Se observa en la figura que la tasa de distorsión armónica total de voltaje está dentro del rango admisible establecido por SIGET (SIGET, s.f.) 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%, con un THDV promedio de 3.48%. 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.

3.3.2.2 Tasa de distorsión armónica de corriente.

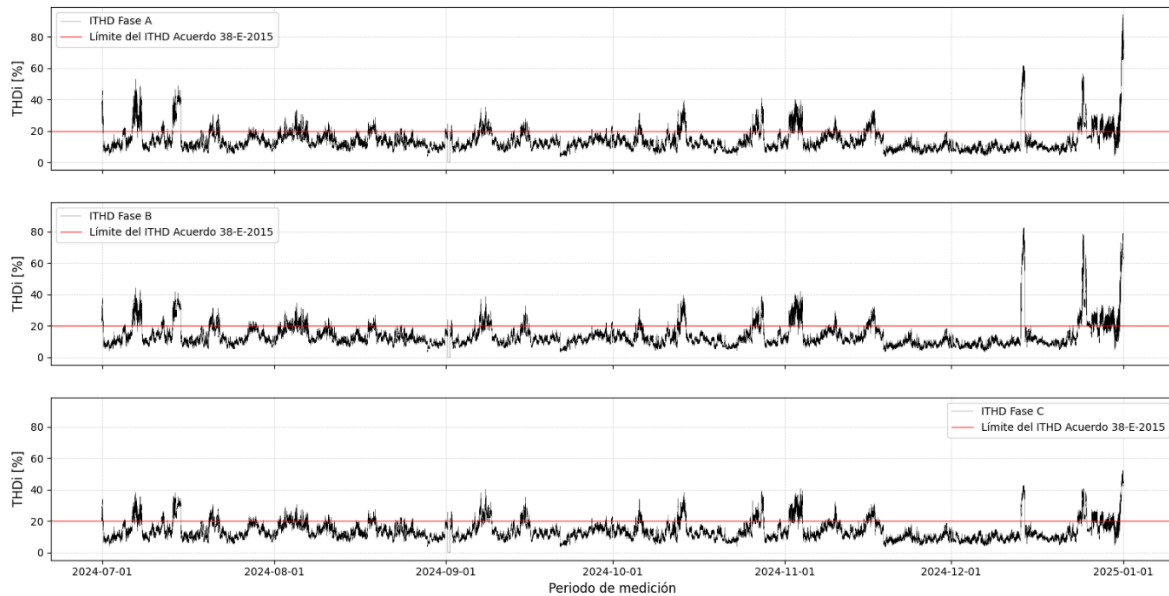


Figura 9. Tasa de Distorsión de Corriente (THDi) en la cartonera.

Se puede observar en la figura que una gran cantidad de registros se encuentran fuera de los límites. Para la tasa de distorsión armónica de corriente tenemos un valor promedio de 13.86% una tasa de registros fuera del límite del 13.71%, estando fuera del límite del 5% establecido por SIGET (SIGET, s.f.). 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.

3.3.3 Flicker

El índice de flicker, relacionado a la percepción de las variaciones en la intensidad lumínica de las fuentes de luz y afectaciones en condiciones de operación de

equipos con microprocesador, generalmente son causados por cargas pulsantes, como hornos de arco eléctrico de fundidoras, trituradoras de piedra, arranque de grandes motores, hornos de inducción y otros.

Las variaciones de las cargas pueden estar relacionadas solo al arranque de motores que se pueden dar de forma repetitiva en el día y ciclos de procesos de baja y alta frecuencia.

También los cortocircuitos que se presentan en la red, principalmente en puntos cercanos a la fuente, pueden afectar en forma instantánea y es un comportamiento eventual.

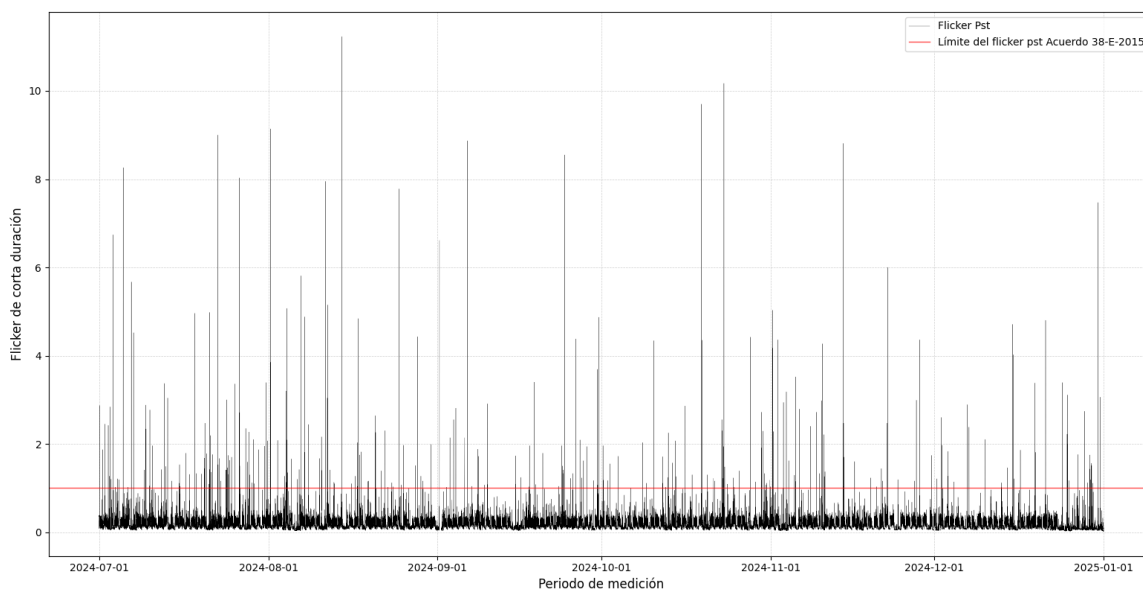


Figura 10. Flicker de Corta Duración (Pst) en la cartonera.

El nivel de flicker que es transmitido por las redes de distribución alcanzó el punto de acople común (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 SIGET (SIGET, s.f.).

3.3.4 Análisis de la curva de probabilidad

Como se puede observar en los histogramas, tenemos una distribución normal centrada para la tensión RMS y el flicker. Esto significa que la mayoría de los valores de estas mediciones se encuentran alrededor de la media aritmética, mientras que una menor cantidad de valores se encuentra lejana a la media. Esto asegura que tanto la tensión como el flicker se encuentren controlados, evitando estar fuera de los límites en la mayor parte del tiempo.

Analizando la mediana y la moda del flicker y las tasas de distorsión armónica de voltaje y corriente, se observa que se tiene un sesgo positivo. Esto comprueba que existen valores atípicos elevados, lo que influye en la forma de distribución de los datos, permitiendo una mayor deformación en la onda sinusoidal de corriente y voltaje.

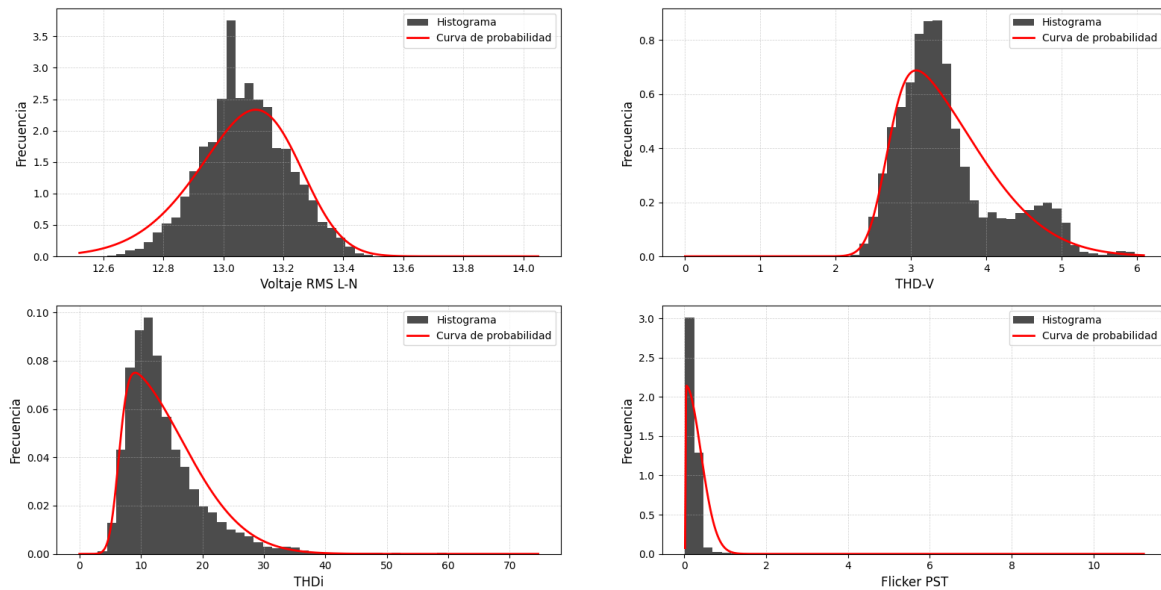


Figura 11. Histogramas y curvas de probabilidad correspondientes al voltaje RMS, THDV, THDi y Flicker Pst de la empresa cartonera.

3.3.5 Análisis de los meses con mayor presencia de huecos de tensión.

En el periodo de julio a diciembre de 2024 se tuvo una cantidad considerable de huecos de tensión críticos, impactando negativamente la operación confiable y constante del cliente.

Se presenta a continuación las curvas ITIC de los meses con mayor cantidad de huecos críticos junto con su tabla, detallando magnitud, duración y causa.

Julio 2024

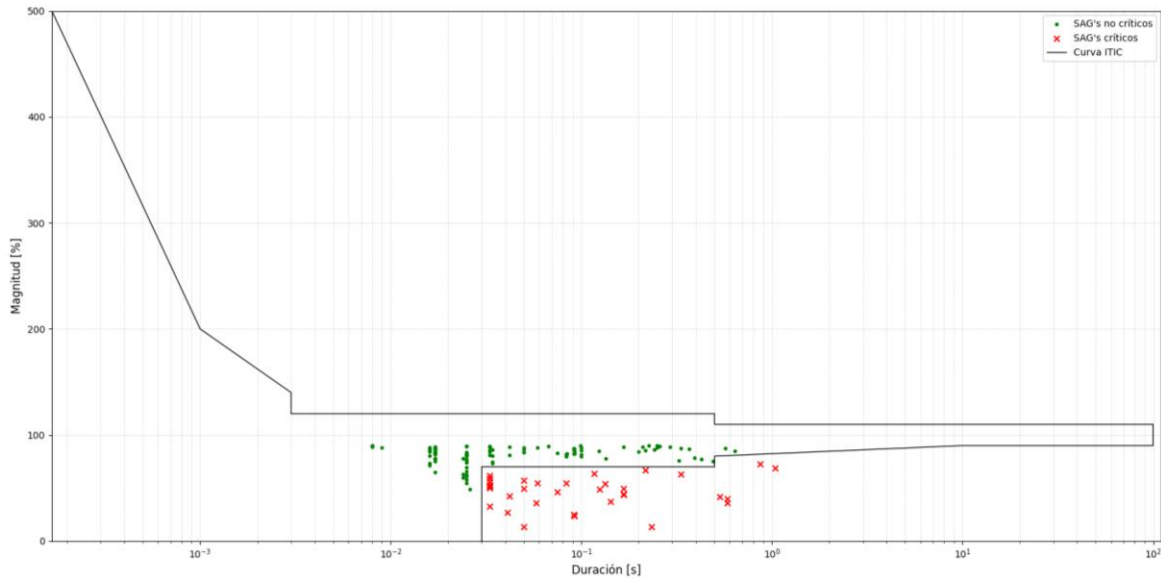


Figura 12. Huecos de tensión detectados en el mes de Julio 2024, en la empresa cartonera.

Tabla 6. Detalle y causas de los huecos de tensión de Julio 2024, en la empresa cartonera.

No.	Fecha	Hora	Magnitud [%]	Duración [s]	Causa
1	1/7/2024	T 15:30:47:560 CST	35.97%	0.058	ND
2	2/7/2024	T 02:02:44:662 CST	63.65%	0.117	Falla a nivel de transmisión
3	2/7/2024	T 23:49:23:467 CST	72.62%	0.867	Falla a nivel de transmisión
4	3/7/2024	T 13:24:05:898 CST	39.77%	0.584	Falla a nivel de distribución
5	6/7/2024	T 21:43:20:367 CST	23.93%	0.092	Falla a nivel de distribución
6	7/7/2024	T 07:27:44:857 CST	13.63%	0.234	Falla a nivel de distribución
7	9/7/2024	T 11:50:40:652 CST	13.39%	0.05	ND
8	9/7/2024	T 14:27:46:262 CST	46.44%	0.075	Falla a nivel de distribución
9	10/7/2024	T 07:03:20:382 CST	68.70%	1.042	Falla a nivel de distribución
10	10/7/2024	T 19:07:48:814 CST	61.77%	0.033	Falla a nivel de distribución por falta de poda

No.	Fecha	Hora	Magnitud [%]	Duración [s]	Causa
11	12/7/2024	T 22:10:44:021 CST	37.00%	0.142	ND
12	13/7/2024	T 05:22:54:943 CST	59.05%	0.033	Falla a nivel de distribución
13	13/7/2024	T 13:27:32:836 CST	62.94%	0.334	Falla a nivel de distribución
14	16/7/2024	T 20:49:52:892 CST	52.50%	0.033	ND
15	18/7/2024	T 11:37:52:348 CST	36.17%	0.584	Contacto por animal
16	20/7/2024	T 08:55:58:357 CST	42.49%	0.042	ND
17	21/7/2024	T 06:55:49:452 CST	41.78%	0.533	Falla a nivel de distribución
18	21/7/2024	T 08:03:29:532 CST	32.55%	0.033	Falla a nivel de distribución
19	23/7/2024	T 00:16:55:371 CST	57.41%	0.05	Mantenimiento
20	24/7/2024	T 14:52:32:385 CST	52.76%	0.033	Arranque de motor
21	24/7/2024	T 21:09:13:882 CST	54.34%	0.059	Mantenimiento
22	25/7/2024	T 06:15:15:868 CST	56.18%	0.033	Falla a nivel de distribución
23	25/7/2024	T 20:15:48:633 CST	44.03%	0.167	Falla a nivel de transmisión
24	26/7/2024	T 16:42:28:611 CST	43.69%	0.167	Falla a nivel de transmisión
25	26/7/2024	T 16:42:29:328 CST	49.72%	0.167	Falla a nivel de transmisión
26	26/7/2024	T 16:43:31:372 CST	48.72%	0.125	Falla a nivel de transmisión
27	26/7/2024	T 16:53:30:376 CST	54.81%	0.083	Falla a nivel de distribución
28	26/7/2024	T 17:02:26:852 CST	24.98%	0.091	Falla a nivel de distribución por falta de poda
29	27/7/2024	T 20:22:58:899 CST	27.23%	0.041	ND
30	28/7/2024	T 03:32:27:874 CST	51.24%	0.033	Falla a nivel de distribución por falta de poda

No.	Fecha	Hora	Magnitud [%]	Duración [s]	Causa
31	28/7/2024	T 11:00:30:555 CST	49.22%	0.05	Falla a nivel de distribución
32	29/7/2024	T 06:27:12:958 CST	66.89%	0.216	ND
33	30/7/2024	T 06:27:23:788 CST	50.04%	0.033	Falla a nivel de distribución
34	31/7/2024	T 13:43:57:447 CST	53.99%	0.133	Falla a nivel de distribución

Agosto 2024

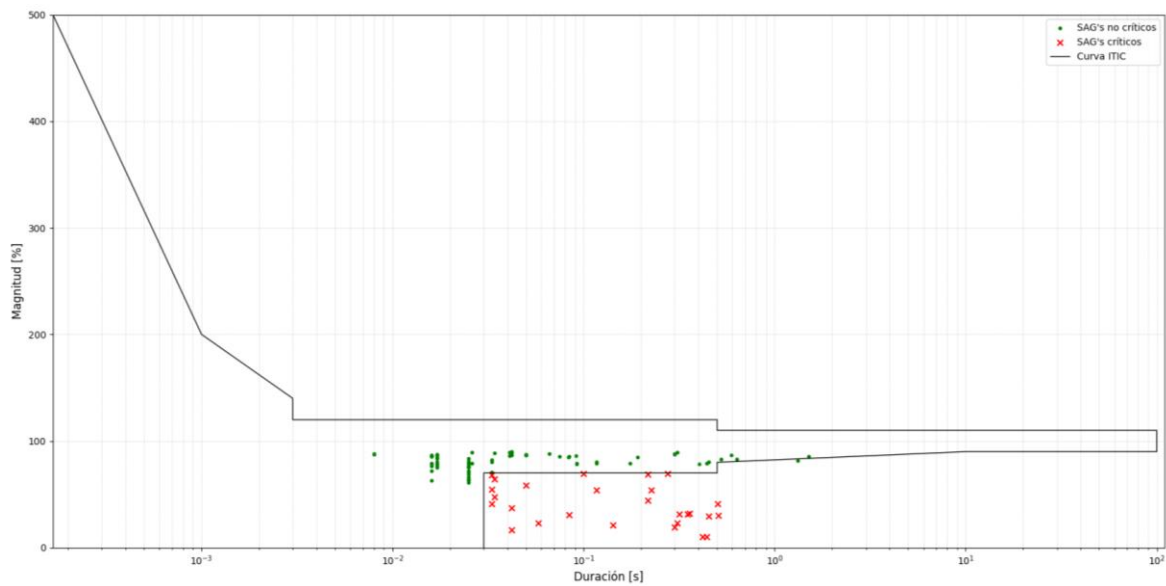


Figura 13. Huecos de tensión detectados en el mes de Agosto 2024, en la empresa cartonera.

Tabla 7. Detalles y causas de los huecos de tensión en Agosto 2024, en la empresa cartonera.

No.	Fecha	Hora	Magnitud [%]	Duración [s]	Causa
1	1/8/2024	T 09:05:14:275 CST	22.87%	0.058	ND
2	2/8/2024	T 16:49:45:049 CST	41.27%	0.033	Falla a nivel de distribución
3	4/8/2024	T 06:23:33:429 CST	30.53%	0.084	Falla a nivel de distribución

No.	Fecha	Hora	Magnitud [%]	Duración [s]	Causa
4	4/8/2024	T 08:10:02:834 CST	31.32%	0.317	Falla a nivel de distribución
5	4/8/2024	T 08:10:13:218 CST	31.76%	0.358	Falla a nivel de distribución
6	4/8/2024	T 08:10:33:640 CST	31.50%	0.35	Falla a nivel de distribución
7	4/8/2024	T 08:11:35:252 CST	68.67%	0.217	Falla a nivel de distribución
8	6/8/2024	T 15:19:00:036 CST	58.53%	0.05	Arranque de motor
9	6/8/2024	T 22:42:49:487 CST	23.24%	0.309	ND
10	7/8/2024	T 15:13:19:524 CST	64.31%	0.034	Falla a nivel de distribución
11	7/8/2024	T 16:27:09:031 CST	40.94%	0.501	Falla a nivel de distribución
12	8/8/2024	T 07:19:58:980 CST	16.76%	0.042	Contacto por animal
13	10/8/2024	T 08:57:30:230 CST	54.87%	0.033	Falla a nivel de distribución
14	11/8/2024	T 10:23:23:207 CST	29.63%	0.45	Falla a nivel de distribución
15	11/8/2024	T 19:19:04:463 CST	53.82%	0.117	Falla a nivel de transmisión
16	11/8/2024	T 21:48:23:762 CST	44.51%	0.217	Falla a nivel de transmisión
17	14/8/2024	T 09:56:08:888 CST	9.89%	0.418	Falla a nivel de distribución
18	14/8/2024	T 09:56:14:377 CST	10.28%	0.442	Falla a nivel de distribución
19	16/8/2024	T 22:19:56:820 CST	67.82%	0.033	Falla a nivel de distribución
20	17/8/2024	T 06:44:00:515 CST	69.61%	0.1	Falla a nivel de distribución
21	17/8/2024	T 11:31:43:805 CST	19.45%	0.3	Falla a nivel de distribución
22	20/8/2024	T 13:41:07:659 CST	69.71%	0.275	ND
23	22/8/2024	T 07:03:27:648 CST	37.26%	0.042	Falla a nivel de distribución
24	24/8/2024	T 21:25:13:089 CST	47.50%	0.034	Falla a nivel de distribución

No.	Fecha	Hora	Magnitud [%]	Duración [s]	Causa
25	24/8/2024	T 21:26:01:592 CST	54.11%	0.225	Falla a nivel de distribución
26	24/8/2024	T 21:26:02:842 CST	30.16%	0.508	Falla a nivel de distribución
27	28/8/2024	T 06:56:02:453 CST	21.24%	0.142	Falla a nivel de distribución

Octubre 2024

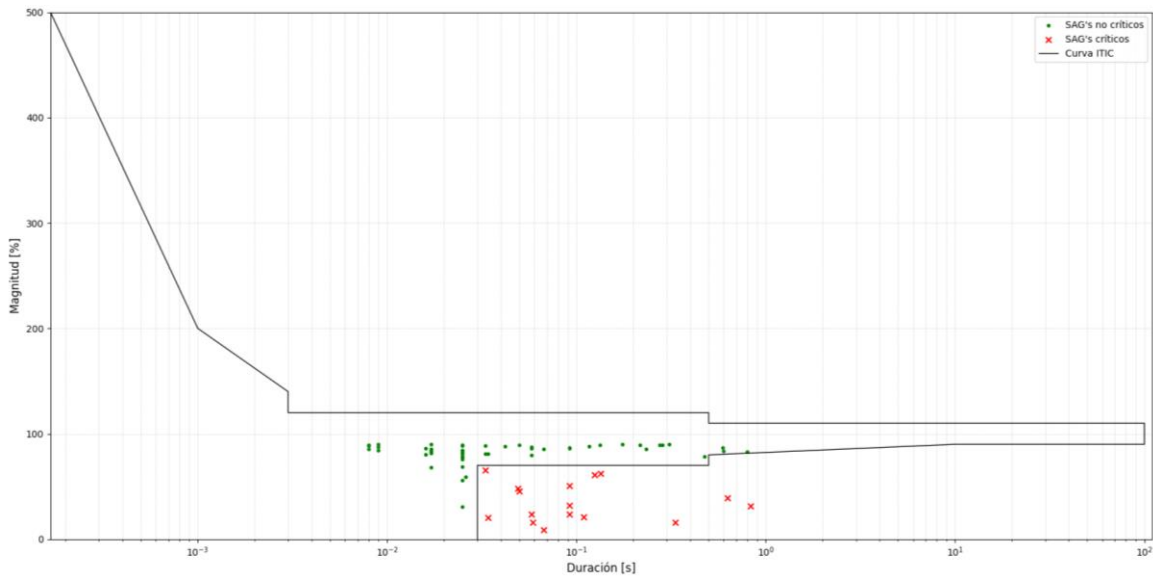


Figura 14. Huecos de tensión detectados en el mes de Octubre 2024, en la empresa cartonera.

Tabla 8. Detalles y causas de los huecos de tensión de Octubre 2024, en la empresa cartonera.

No.	Fecha	Hora	Magnitud [%]	Duración [s]	Causa
1	1/10/2024	T 06:30:55:411 CST	46.53%	0.034	Falla a nivel de distribución
2	2/10/2024	T 03:49:21:476 CST	63.87%	0.033	Falla a nivel de distribución por falta de poda
3	8/10/2024	T 13:38:36:526 CST	48.02%	0.034	ND
4	10/10/2024	T 14:32:21:384 CST	21.61%	0.159	Falla a nivel de distribución

No.	Fecha	Hora	Magnitud [%]	Duración [s]	Causa
5	12/10/2024	T 05:34:32:635 CST	68.03%	0.084	Falla a nivel de distribución
6	12/10/2024	T 06:00:11:081 CST	63.73%	0.033	Falla a nivel de distribución
7	14/10/2024	T 11:22:32:190 CST	79.05%	0.576	Falla a nivel de distribución
8	16/10/2024	T 06:51:08:341 CST	62.55%	0.067	Falla a nivel de distribución
9	19/10/2024	T 11:09:52:144 CST	24.07%	0.125	Falla a nivel de distribución
10	23/10/2024	T 00:56:51:623 CST	45.62%	0.05	Falla a nivel de distribución
11	23/10/2024	T 02:07:28:535 CST	44.37%	0.05	Falla a nivel de distribución por falta de poda
12	23/10/2024	T 09:40:10:004 CST	42.93%	0.041	ND
13	23/10/2024	T 10:11:24:361 CST	17.05%	0.375	Falla a nivel de distribución
14	28/10/2024	T 06:53:14:283 CST	20.47%	0.392	Falla a nivel de distribución
15	30/10/2024	T 06:45:26:522 CST	50.48%	0.034	Falla a nivel de distribución
16	30/10/2024	T 07:35:03:114 CST	58.63%	0.233	Falla a nivel de distribución
17	30/10/2024	T 13:14:04:089 CST	61.50%	0.208	Falla a nivel de distribución

El mes de julio 2024 fue, por una gran diferencia, el mes más crítico respecto a los huecos de tensión, teniendo un total de 34 huecos críticos. En este mes se tuvo un acumulado entre 400 a 500 mm de lluvia, según datos del MARN, lo que puede explicar los funcionamientos transitorios de los interruptores de la subestación a la que está conectada el cliente.

Se puede concluir a partir de la tabla, que la mayoría de los huecos de tensión fueron causados por eventos a nivel de distribución, ya sean por funcionamientos transitorios de los elementos tele controlados (interruptores y/o reclosers) o por fallas sostenidas en los circuitos eléctricamente cercanos al cliente.

3.4 Empresa embotelladora.

Para la segunda empresa, de igual forma, debemos de tomar en cuenta la información disponible del cliente. En los datos de tensión tenemos un voltaje línea a neutro de 26.6 kV RMS y un voltaje línea a línea de 46 kV RMS. A partir de estos datos, podemos definir los límites superiores e inferiores para el monitoreo de la regulación de tensión.

Según la tabla 1, los límites mínimos y máximos son establecidos de acuerdo con el área de servicio en la que se encuentre el cliente. Por lo tanto, debido a que este cliente se encuentra en una zona urbana y la tensión servida al cliente es de 26.6 kV (cliente de media tensión), el límite mínimo y máximo de tensión será de $\pm 6\%$.

Es decir:

Definición de límite inferior

$$V_{min} = V_{nominal} \times 0.94$$

$$V_{min} = 26,558 V \times 0.94$$

$$V_{min} \cong 24,964 V = 24.96 kV$$

Definición de límite superior

$$V_{max} = V_{nominal} \times 1.06$$

$$V_{max} = 26,558 V \times 1.06$$

$$V_{max} \cong 28,151 V = 28.15 kV$$

Se estará usando como voltaje mínimo 24.96 kV y como voltaje máximo 28.15 kV.

Una vez definidos los límites de tensión y tomando en cuenta los límites de armónicos y flicker de las tablas tabla 2, tabla 3 y tabla 4, procedemos con el análisis punto por punto. Para el análisis de huecos de tensión, se usará la curva ITIC.

3.4.1 Regulación de tensión

El perfil de tensión durante el periodo de medición puede apreciarse en la figura, en ella están plasmados los valores RMS de voltaje medidos. Los valores para cada una de las fases se encuentran dentro del rango permitido, sin registros fuera de los límites establecidos.

Tenemos un valor promedio de tensión línea a neutro rms de 26.49 kV, el cual está dentro del límite establecido. Calculando el valor de la mediana a partir del método “.median()” de la librería pandas, obtenemos el mismo valor que el valor promedio (26.49 kV). Por lo tanto, los datos tienden a comportarse con una distribución Gaussiana.

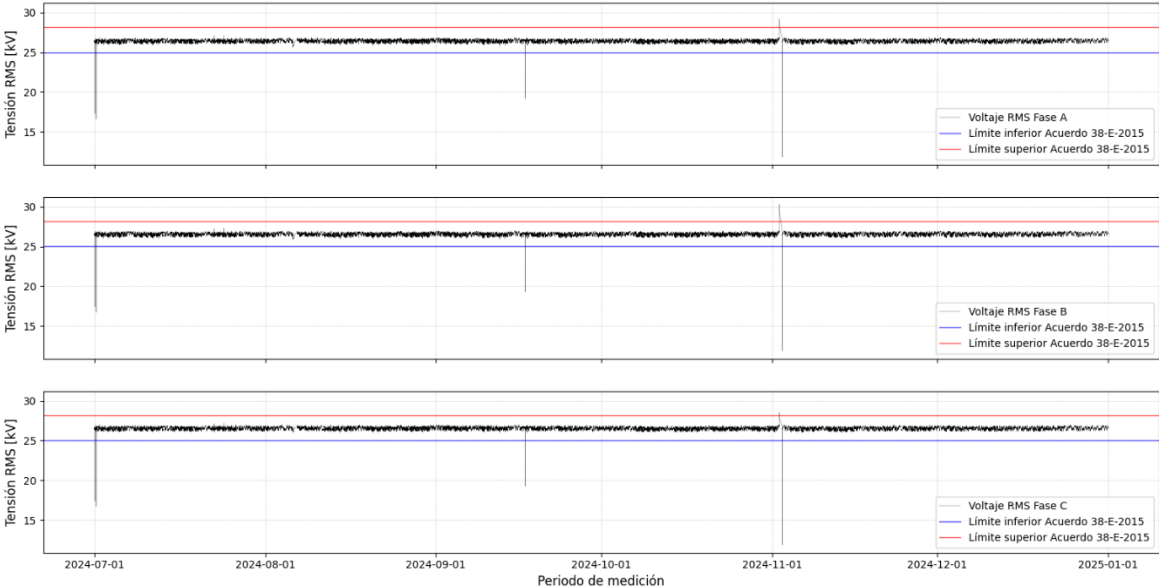


Figura 15. Perfil de tensión RMS en las tres fases de la embotelladora.

Se puede observar en el perfil de tensión que el circuito al que está conectado la empresa cartonera 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, s.f.).

Los datos indican caídas súbitas de tensión a lo largo del periodo de medición sin llegar a un nivel menor a 0.1 p.u. de la tensión nominal, estando por debajo del límite inferior de 24.96 kV. Por lo tanto, se concluye que estas caídas súbitas de tensión se deben a interrupciones momentáneas (menores a 3 minutos).

En el mes de noviembre 2024 (específicamente el 2° día del mes), se observa en la figura una subida repentina de tensión, y posterior a ella, una pérdida de datos. Luego de la desconexión de los equipos, observamos que la tensión se recupera en un valor aproximado de 11.84 kV, significando la recuperación de la medición. Esto indica que hubo una interrupción sostenida considerable, causando tanto pérdidas económicas por la desconexión de los equipos como pérdidas en el registro continuo de datos por parte del equipo PQube.

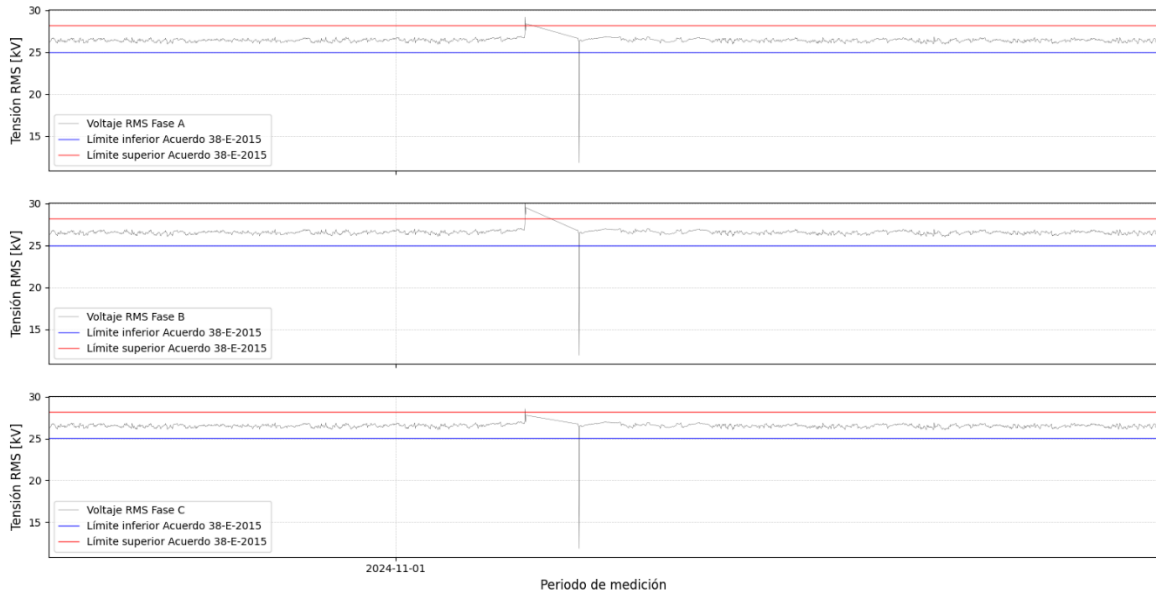


Figura 16. Interrupción sostenida detectada en noviembre 2024, en la empresa embotelladora.

3.4.2 Armónicos

3.4.2.1 Tasa de distorsión armónica de voltaje.

La tasa de distorsión armónica de voltaje o comúnmente conocida como THD por sus siglas en inglés, es la distorsión de la onda sinusoidal de tensión a la frecuencia nominal (60 Hz). El THD o VDAT según la normativa SIGET (SIGET, s.f.) indica el grado de contaminación armónica total que existe en la señal de voltaje.

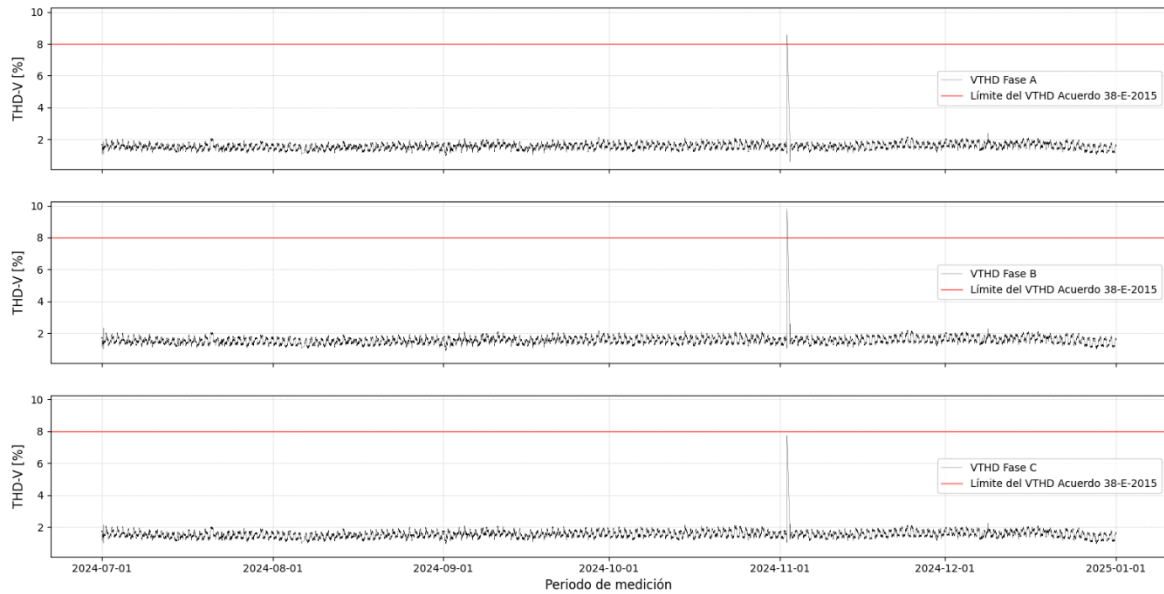


Figura 17. Tasa de distorsión armónica de voltaje (VTHD) de la embotelladora.

Se observa en la figura que la tasa de distorsión armónica total de voltaje está dentro del rango admisible establecido por SIGET (SIGET, s.f.). 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%, con un THDV promedio de 1.56%. Gracias a que la tasa de distorsión armónica de tensión se encuentra dentro del límite y está alejado del límite del 8%, garantiza el suministro de la energía eléctrica con una muy buena forma de onda de tensión sinusoidal con muy poco contenido armónico.

3.4.2.2 Tasa de distorsión armónica de corriente.

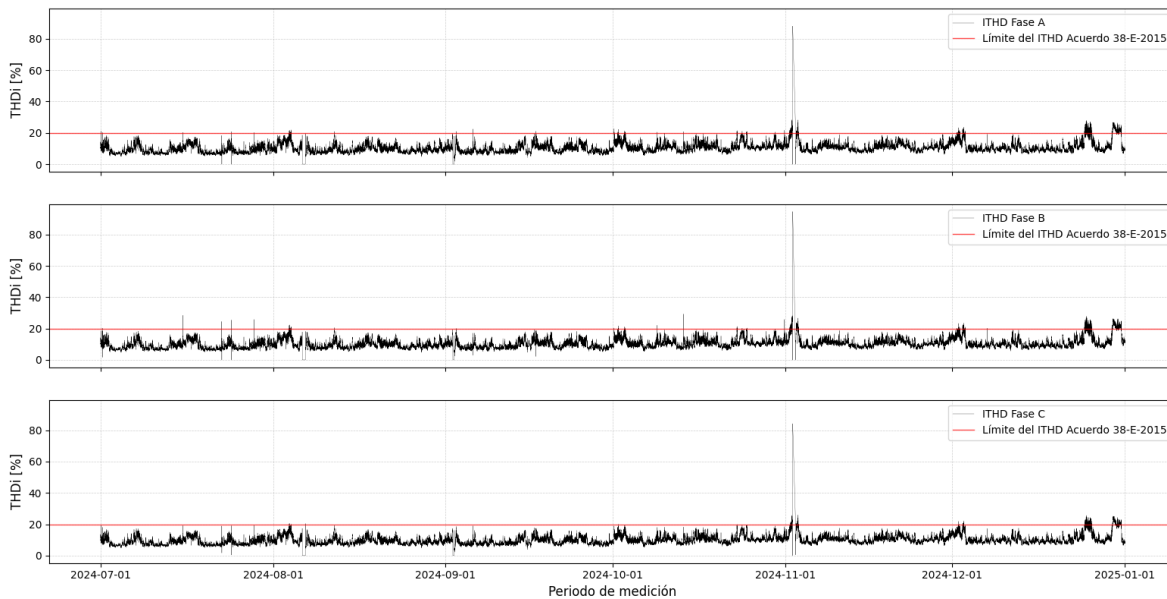


Figura 18. Tasa de distorsión armónica de corriente (ITHD) de la embotelladora.

Se observa que, a diferencia de la cartonera, tenemos una tasa de distorsión armónica de corriente más estable, teniendo una media de 10.23% y una tasa de registros fuera del límite establecido por SIGET del 1.76%. 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.

3.4.3 Flicker

El índice de flicker, relacionado a la percepción de las variaciones en la intensidad lumínica de las fuentes de luz y afectaciones en condiciones de operación de equipos con microprocesador, generalmente son causados por cargas pulsantes, como hornos de arco eléctrico de fundidoras, trituradoras de piedra, arranque de grandes motores, hornos de inducción y otros.

Las variaciones de las cargas pueden estar relacionadas solo al arranque de motores que se pueden dar de forma repetitiva en el día y ciclos de procesos de baja y alta frecuencia.

También los cortocircuitos que se presentan en la red, principalmente en puntos cercanos a la fuente, pueden afectar en forma instantánea y es un comportamiento eventual.

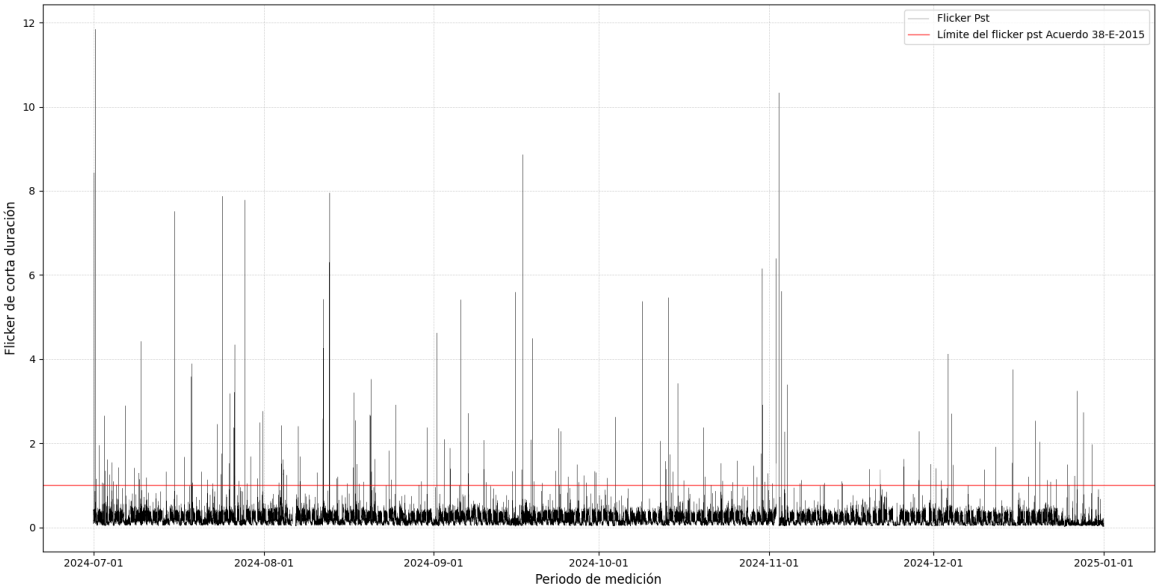


Figura 19. Flicker de Corta Duración (Pst) en la embotelladora.

El nivel de flicker que es transmitido por las redes de distribución alcanzó el punto de acople común (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, se 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 SIGET (SIGET, s.f.).

3.4.4 Análisis de la curva de probabilidad

Como se puede observar en los histogramas, tenemos una distribución normal centrada para la tensión RMS y la tasa de distorsión armónica de voltaje. Esto significa que la mayoría de los valores de estas mediciones se encuentran alrededor de la media aritmética, mientras que una menor cantidad de valores se encuentra lejana a la media. Esto asegura que tanto la tensión como la VTHD se encuentren controlados, evitando estar fuera de los límites en la mayor parte del tiempo.

Analizando la mediana y la moda del flicker y las tasas de distorsión armónica de corriente, se observa que se tiene un sesgo positivo. Esto comprueba que existen valores atípicos elevados, lo que influye en la forma de distribución de los datos, permitiendo una mayor deformación en la onda sinusoidal de corriente.

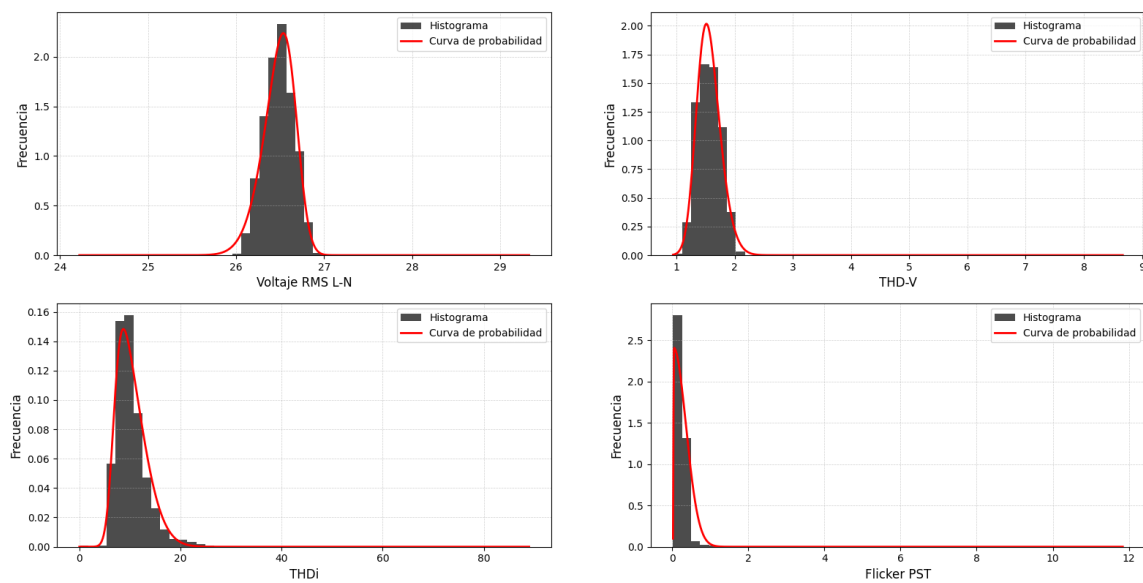


Figura 20. Histogramas y curvas de probabilidad correspondientes al voltaje RMS, THDV, THDi y Flicker Pst de la empresa embotelladora.

Comparando los histogramas entre la cartonera y la empresa embotelladora, podemos observar una mayor estabilidad en los datos. Los histogramas que más denotan la estabilidad de los circuitos son las THD de corriente y voltaje.

3.4.5 Análisis de los meses con mayor presencia de huecos de tensión.

Julio 2024

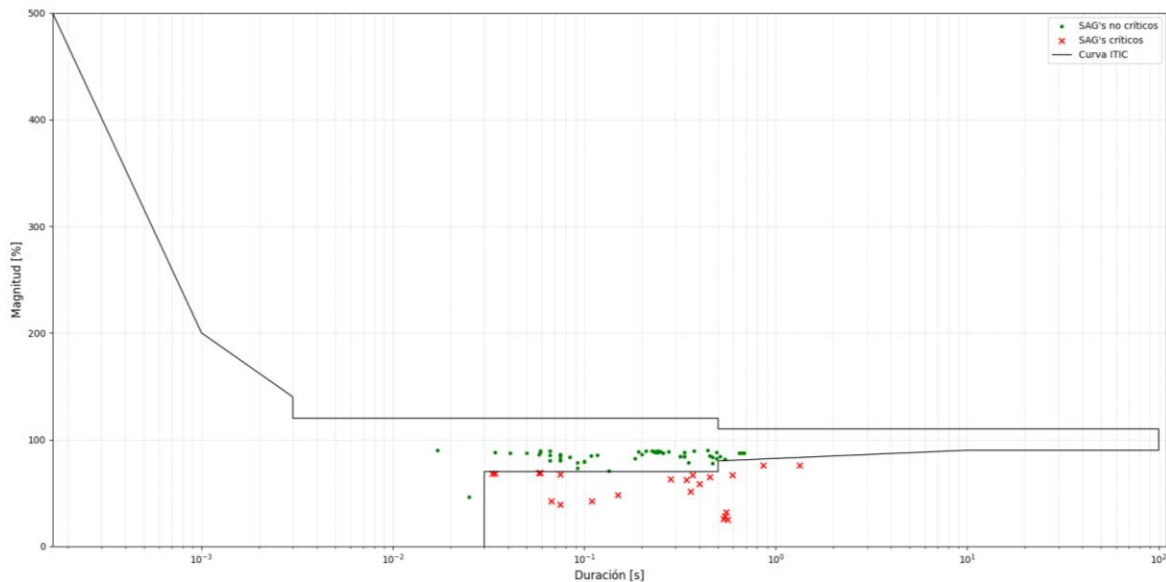


Figura 21. Huecos de tensión detectados en el mes de Julio 2024, en la empresa embotelladora.

Tabla 9. Detalles y causas de los huecos de tensión de Julio 2024, en la empresa embotelladora.

No.	Fecha	Hora	Magnitud [%]	Duración [s]	Causa
1	2/7/2024	T 23:49:23:331 CST	75.88%	0.859	Falla a nivel de transmisión
2	3/7/2024	T 14:09:49:185 CST	68.92%	0.058	ND
3	6/7/2024	T 18:30:19:933 CST	63.11%	0.283	ND
4	9/7/2024	T 10:28:23:304 CST	68.41%	0.034	ND
5	9/7/2024	T 15:28:04:697 CST	66.60%	0.591	Pérdida de carga

No.	Fecha	Hora	Magnitud [%]	Duración [s]	Causa
6	9/7/2024	T 15:33:09:170 CST	67.69%	0.075	Pérdida de carga
7	15/7/2024	T 18:30:05:765 CST	32.37%	0.551	Falla a nivel de transmisión
8	18/7/2024	T 19:49:53:909 CST	64.67%	0.45	Falla a nivel de transmisión
9	18/7/2024	T 22:55:16:699 CST	51.49%	0.358	Falla a nivel de transmisión
10	22/7/2024	T 19:01:25:689 CST	28.10%	0.543	Falla a nivel de transmisión
11	22/7/2024	T 19:08:53:422 CST	39.09%	0.075	Falla a nivel de transmisión
12	23/7/2024	T 13:08:03:214 CST	75.89%	1.326	ND
13	24/7/2024	T 12:21:31:952 CST	42.65%	0.109	Falla a nivel de transmisión
14	24/7/2024	T 12:21:33:612 CST	25.67%	0.534	Falla a nivel de transmisión
15	24/7/2024	T 12:23:20:198 CST	42.11%	0.067	Falla a nivel de transmisión
16	25/7/2024	T 18:02:44:983 CST	68.95%	0.059	ND
17	25/7/2024	T 20:15:48:618 CST	48.43%	0.15	Falla a nivel de transmisión
18	26/7/2024	T 13:58:08:254 CST	66.60%	0.366	Transferencia de carga
19	26/7/2024	T 18:05:42:638 CST	58.69%	0.399	Falla a nivel de transmisión
20	27/7/2024	T 12:11:22:425 CST	68.00%	0.033	ND
21	28/7/2024	T 14:04:17:035 CST	24.83%	0.558	Falla a nivel de transmisión
22	31/7/2024	T 20:06:19:196 CST	62.41%	0.342	Falla a nivel de transmisión

Agosto 2024

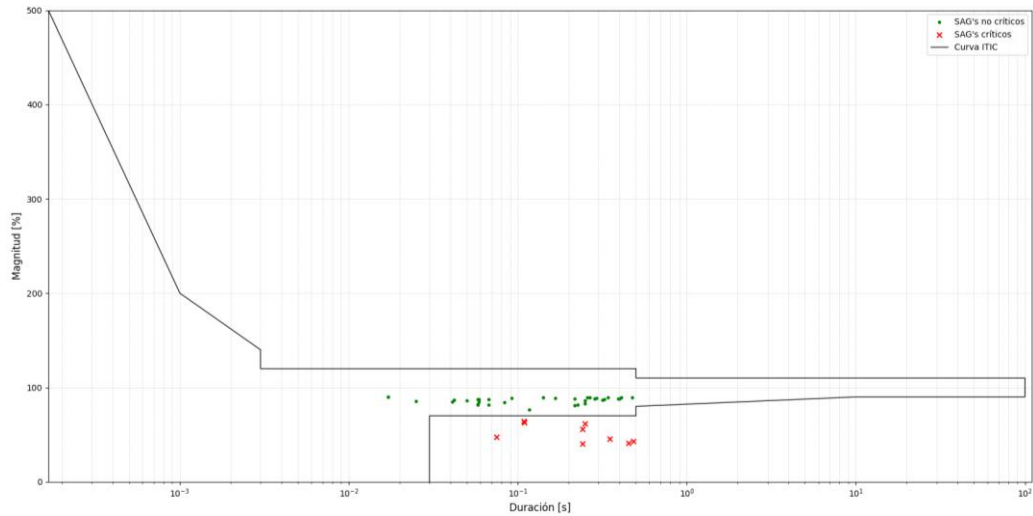


Figura 22. Huecos de tensión detectados en el mes de Agosto 2024, en la empresa embotelladora.

Tabla 10. Detalles y causas de los huecos de tensión de Agosto 2024, en la empresa embotelladora.

No.	Fecha	Hora	Magnitud [%]	Duración [s]	Causa
1	4/8/2024	T 05:45:11:620 CST	47.79%	0.075	ND
2	11/8/2024	T 19:19:04:459 CST	62.68%	0.109	Falla a nivel de transmisión
3	11/8/2024	T 19:55:37:148 CST	45.37%	0.35	Falla a nivel de transmisión
4	11/8/2024	T 21:48:23:747 CST	40.75%	0.242	Falla a nivel de transmisión
5	12/8/2024	T 23:40:32:349 CST	42.72%	0.484	Falla a nivel de transmisión
6	13/8/2024	T 00:26:18:485 CST	41.01%	0.45	Falla a nivel de transmisión
7	17/8/2024	T 11:31:43:568 CST	55.98%	0.242	Falla a nivel de transmisión
8	17/8/2024	T 16:47:28:261 CST	64.51%	0.108	Falla a nivel de transmisión
9	20/8/2024	T 13:41:07:588 CST	61.71%	0.25	Falla a nivel de transmisión

Septiembre 2024

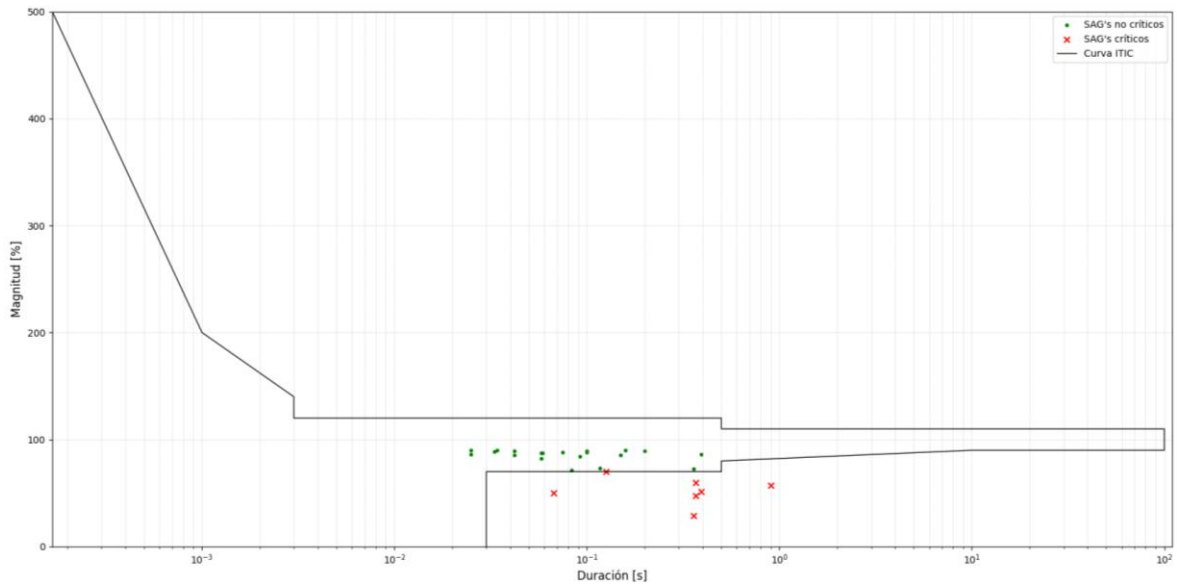


Figura 23 Huecos de tensión detectados en el mes de Septiembre 2024, en la empresa embotelladora.

Tabla 11. Detalles y causas de los huecos de tensión de Septiembre 2024, en la empresa embotelladora.

No.	Fecha	Hora	Magnitud [%]	Duración [s]	Causa
1	1/9/2024	T 12:25:26:106 CST	47.39%	0.367	Falla a nivel de transmisión
2	5/9/2024	T 21:19:20:147 CST	28.95%	0.359	Falla a nivel de transmisión
3	7/9/2024	T 07:11:46:285 CST	59.62%	0.367	Falla a nivel de transmisión
4	15/9/2024	T 18:53:52:495 CST	57.20%	0.9	ND
5	18/9/2024	T 16:38:22:535 CST	69.84%	0.126	Falla a nivel de transmisión
6	18/9/2024	T 23:29:58:919 CST	51.67%	0.391	Falla a nivel de transmisión
7	24/9/2024	T 02:49:48:916 CST	50.05%	0.067	ND

3.5 Análisis de rendimiento de SagFighter

Dentro de las alternativas para la mitigación de los huecos de tensión expuestos en el trabajo, se ha decidido analizar el rendimiento y efectividad del mitigador de huecos de tensión “SagFighter”.

Este equipo se encuentra instalado en un edificio de servicios corporativos donde se tenía una alta cantidad de huecos de tensión, afectando los siguientes aspectos:

Interrupción de equipos electrónicos: Como computadoras, impresoras u otros dispositivos de oficina de electrónica sensible, provocando reinicios involuntarios, pérdida de datos no guardados o reducción de la vida útil

Daño o desgaste de hardware: Como las fuentes de alimentación de las computadoras, el aire acondicionado o equipos de red, significando en la reducción de la vida útil de estos dispositivos electrónicos sensibles.

Pérdida de productividad: Como se comentó anteriormente, un hueco de tensión podría provocar reinicios forzados, significando en tiempo perdido por el reinicio de los sistemas o en la recuperación de los datos.

Sistema de respaldo insuficientes: En caso de no tener Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (o UPS por sus siglas en inglés), un hueco de tensión crítico podría producir los reinicios comentados anteriormente.

Debido a los problemas que conlleva tener una alta cantidad de huecos de tensión en edificios con este tipo de servicios, se optó por la instalación de un mitigador de huecos de tensión. Ya que, según datos del fabricante, tiene una mitigación del 100% de huecos de tensión no críticos y un 80% de huecos de tensión críticos.

Dentro de los objetivos de este estudio, está el proponer equipos a partir de las evaluaciones técnicas y económicas en usuarios industriales, así como comparar la calidad de la energía en la entrada y salida de la subestación del cliente. Debido a que los SagFighters es una tecnología “relativamente nueva” en el país, no se tienen muchos clientes industriales que posean este equipo en sus instalaciones.

Por lo que se realizará el estudio de los huecos de tensión en el edificio de servicios corporativos, para evaluar los huecos de tensión registrados en el mismo periodo de estudio y realizar una proyección en la empresa embotelladora embotelladas y la empresa cartonera.

Antes de iniciar con el análisis de los huecos de tensión y calcular el rendimiento del SagFighter, debemos de entender cuando un hueco de tensión ha sido mitigado o no.

3.5.1 Hueco de tensión no mitigado

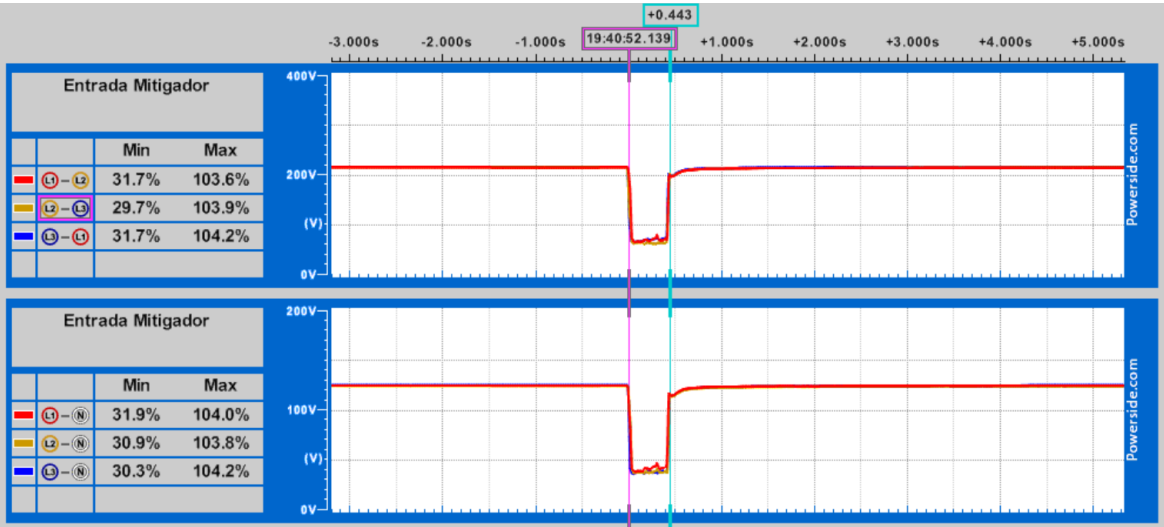


Figura 24. Tensión RMS a la entrada del SagFighter del hueco de tensión No. 10.

El hueco de tensión con el correlativo No. 10, se observa que la magnitud en la entrada del mitigador de menor valor fue del 29.7% de la tensión nominal línea – línea (61.78 V) y del 30.3% de la tensión nominal línea – neutro (36.36 V), siendo estos valores extremadamente bajos para la operación normal de equipos.

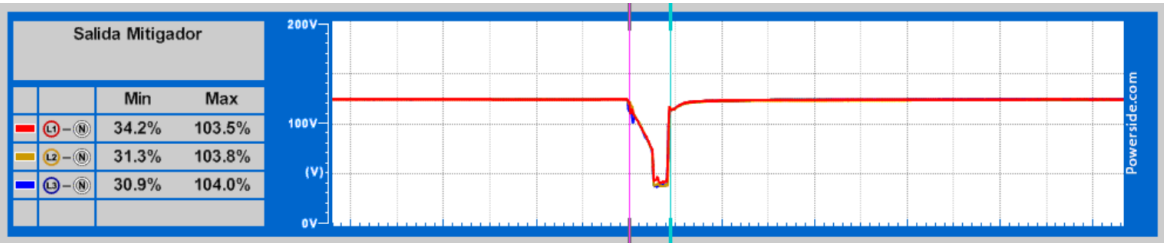


Figura 25. Tensión RMS a la salida del SagFighter del hueco de tensión No. 10.

Podemos ver que la magnitud de salida del mitigador es prácticamente la misma (30.9%), por lo que este hueco de tensión no pudo ser mitigado.

3.5.2 Hueco de tensión mitigado

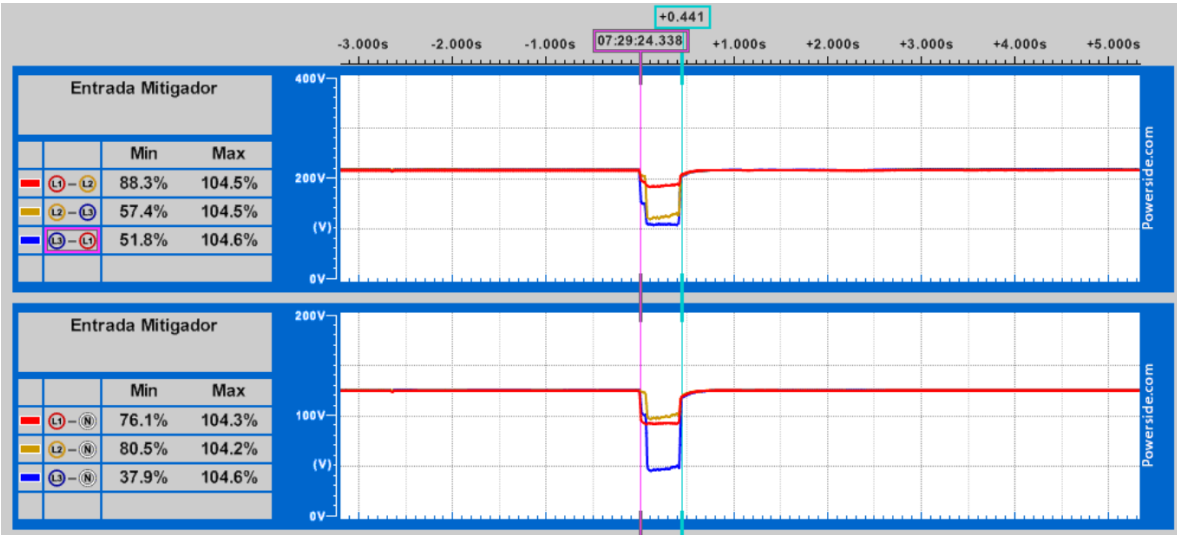


Figura 26. Tensión RMS a la entrada del SagFighter del hueco de tensión No. 46.

Para el caso del hueco de tensión con correlativo No. 46, tenemos una magnitud mínima del 37.9% de la tensión nominal línea – neutro (45.48 V) en la entrada del SagFighter.

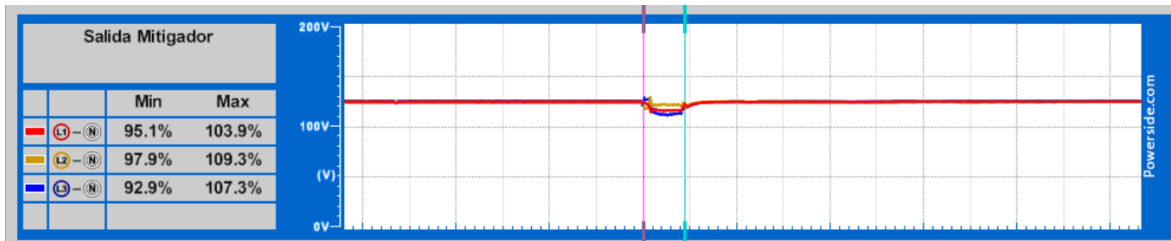


Figura 27. Tensión RMS a la salida del hueco de tensión No. 46.

Podemos observar que, a diferencia del correlativo No. 10 y los demás huecos no mitigados, este logró elevar la magnitud de la tensión nominal hasta un 92.9% (111.48 V) mitigando con éxito el hueco de tensión, protegiendo los equipos conectados al circuito de la empresa.

3.5.3 Análisis de huecos de tensión en edificio de servicios corporativos

En el periodo de estudio, comprendido desde el 1º de julio al 31 de diciembre de 2024, se tuvo un total de 254 huecos de tensión, de los cuales 55 fueron críticos. Se presenta a continuación la curva ITIC de los huecos de tensión registrados en el periodo de control y la tabla de análisis por hueco de tensión.

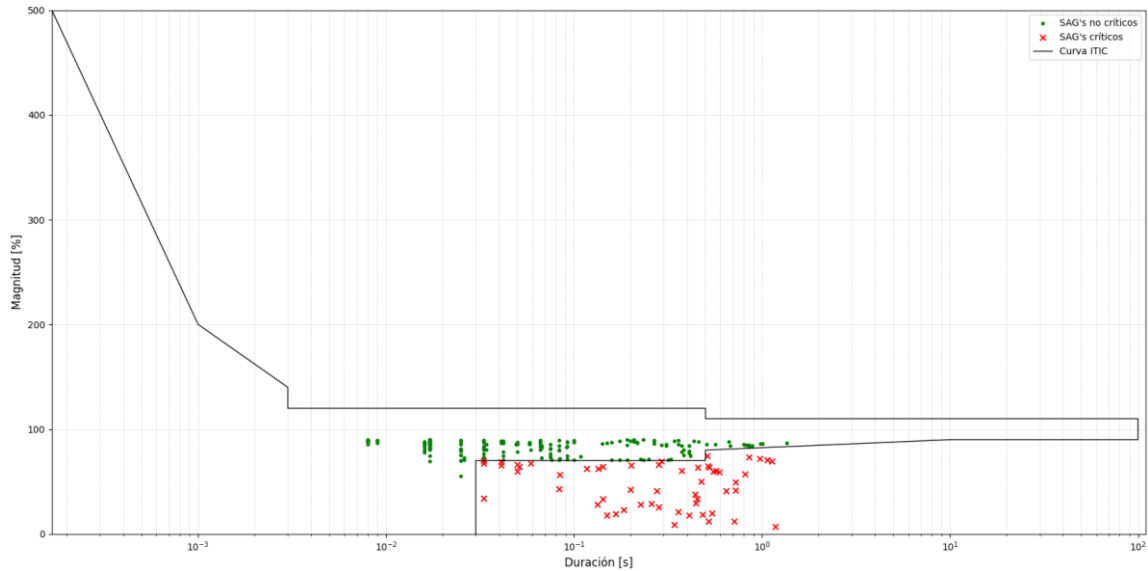


Figura 28. Curva ITIC con todos los huecos de tensión registrados en el edificio de servicios corporativos.

Tabla 12. Detalles y causas de los huecos de tensión en el periodo medido en el edificio de servicios corporativos.

No.	Fecha	Hora	Magnitud de entrada [%]	Duración [s]	Tipo de falla	Causa	Magnitud de salida [%]	Resultado
1	2/7/2024	23:51:37:150	73.11%	0.851	3L	ND	97.70%	Mitigó
2	5/7/2024	07:04:22:393	28.13%	0.133	3L	Contacto animal	81.30%	Mitigó
3	10/7/2024	10:37:48:374	17.96%	0.15	3L	Contacto animal	62.40%	No mitigó
4	12/7/2024	09:55:13:396	59.14%	0.592	2L	Contacto animal	95.60%	Mitigó
5	12/7/2024	10:07:00:018	60.54%	0.567	2L	Contacto animal	95.50%	Mitigó
6	12/7/2024	10:08:37:561	59.84%	0.551	2L	Ramas sobre las líneas	96.10%	Mitigó
7	15/7/2024	18:19:00:614	65.42%	0.041	2L	ND	97.40%	Mitigó
8	15/7/2024	18:19:32:795	66.21%	0.05	2L	ND	97.40%	Mitigó
9	17/7/2024	13:39:20:078	69.23%	1.126	2L	Contacto animal	93.50%	Mitigó
10	18/7/2024	19:40:52:139	29.71%	0.443	3L	Sin revis.	30.90%	No mitigó

No.	Fecha	Hora	Magnitud de entrada [%]	Duración [s]	Tipo de falla	Causa	Magnitud de salida [%]	Resultado
11	21/7/2024	08:48:43:915	66.44%	0.283	2L	Contacto animal	96.70%	Mitigó
12	22/7/2024	05:48:19:267	63.68%	0.525	2L	Contacto animal	97.10%	Mitigó
13	22/7/2024	06:15:33:759	57.50%	0.808	2L	Contacto animal	97.60%	Mitigó
14	25/7/2024	20:18:58:780	33.28%	0.142	2L	Sin revis.	92.10%	Mitigó
15	26/7/2024	16:45:38:032	62.44%	0.134	3L	Disparo de línea	93.10%	Mitigó
16	26/7/2024	17:38:01:302	50.19%	0.476	3L	Contacto animal	94.90%	Mitigó
17	30/7/2024	22:02:39:107	40.76%	0.642	3L	ND	41.40%	No mitigó
18	4/8/2024	06:54:53:081	7.19%	1.174	3L	Descarga atmosférica	7.20%	No mitigó
19	6/8/2024	02:15:54:072	64.69%	0.517	3L	Contacto animal	98.00%	Mitigó
20	9/8/2024	08:34:45:474	28.30%	0.225	3L	Contacto animal	74.70%	Mitigó
21	11/8/2024	19:22:23:399	56.24%	0.084	3L	Descarga atmosférica	96.10%	Mitigó
22	11/8/2024	21:51:42:599	42.32%	0.2	3L	Descarga atmosférica	96.20%	Mitigó
23	17/8/2024	11:34:57:948	40.98%	0.276	3L	Contacto animal	92.10%	Mitigó
24	20/8/2024	13:44:19:483	65.52%	0.201	3L	Contacto animal	94.40%	Mitigó
25	29/8/2024	17:50:47:492	60.16%	0.375	3L	Contacto animal	70.90%	Mitigó
26	29/8/2024	17:50:48:793	20.97%	0.358	3L	Contacto animal	71.00%	Mitigó
27	29/8/2024	17:50:49:168	18.75%	0.483	3L	Contacto animal	71.00%	Mitigó
28	30/8/2024	16:51:10:231	69.58%	0.291	2L	Contacto animal	96.80%	Mitigó
29	11/9/2024	20:04:24:656	74.49%	0.509	3L	Contacto animal	83.80%	Mitigó
30	11/9/2024	20:04:26:431	33.19%	0.45	3L	Contacto animal	83.80%	Mitigó
31	15/9/2024	07:13:50:780	42.96%	0.083	2L	Contacto animal	96.20%	Mitigó

No.	Fecha	Hora	Magnitud de entrada [%]	Duración [s]	Tipo de falla	Causa	Magnitud de salida [%]	Resultado
32	17/9/2024	19:39:14:000	55.10%	0.025	2L	Asumible funcionamiento cortocircuito	82.90%	Mitigó
33	18/9/2024	16:41:11:006	62.55%	0.117	2L	ND	93.30%	Mitigó
34	23/9/2024	19:22:43:521	67.21%	0.033	2L	ND	95.90%	Mitigó
35	30/9/2024	07:20:21:874	17.93%	0.408	3L	Contacto animal	59.40%	No Mitigó
36	8/10/2024	19:11:53:705	71.95%	0.976	3L	Descarga atmosférica	97.70%	Mitigó
37	9/10/2024	11:13:35:289	68.98%	0.041	2L	Descarga atmosférica	97.00%	Mitigó
38	11/10/2024	03:09:37:547	67.64%	0.059	3L	Asumible a funcionamiento cortocircuito	93.70%	Mitigó
39	12/10/2024	10:54:16:523	28.90%	0.258	3L	Asumible a funcionamiento interruptor	84.80%	Mitigó
40	18/10/2024	06:49:44:864	71.01%	1.066	3L	Asumible a funcionamiento interruptor	94.50%	Mitigó
41	22/10/2024	16:16:20:911	19.45%	0.167	3L	Asumible a funcionamiento interruptor	74.30%	Mitigó
42	30/10/2024	13:16:18:719	64.20%	0.142	3L	Contacto animal	95.00%	Mitigó
43	1/11/2024	14:03:10:914	12.20%	0.518	3L	ND	51.00%	No mitigó
44	4/11/2024	07:13:47:851	63.78%	0.457	2L	Contacto animal	96.60%	Mitigó
45	6/11/2024	14:54:25:185	12.14%	0.708	2L	ND	12.10%	No mitigó
46	10/11/2024	07:29:24:338	37.93%	0.441	2L	Contacto animal	92.90%	Mitigó
47	14/11/2024	07:24:24:490	19.77%	0.543	3L	Contacto animal	73.00%	No mitigó
48	19/11/2024	06:32:14:277	8.69%	0.342	3L	Contacto animal	58.50%	No mitigó
49	21/11/2024	11:11:53:575	41.44%	0.725	2L	Funcionamiento interruptor.	93.00%	Mitigó
50	27/11/2024	09:41:20:594	69.84%	0.033	2L	ND	96.50%	Mitigó
51	10/12/2024	06:13:50:831	34.01%	0.033	3L	ND	87.60%	Mitigó

No.	Fecha	Hora	Magnitud de entrada [%]	Duración [s]	Tipo de falla	Causa	Magnitud de salida [%]	Resultado
52	15/12/2024	09:31:59:548	25.50%	0.283	3L	ND	83.20%	Mitigó
53	24/12/2024	06:45:58:942	64.20%	0.051	3L	Funcionamiento interruptor.	95.00%	Mitigó
54	29/12/2024	07:44:12:042	22.99%	0.184	3L	Contacto animal	80.20%	Mitigó
55	31/12/2024	08:46:30:730	49.40%	0.725	3I	ND	97.80%	Mitigó

Dentro del tipo de falla, relacionadas a los huecos de tensión medidos en el periodo de control, se tiene un 68% de fallas trifásicas y un 32% de fallas bifásicas. No se tiene ningún registro de falla monofásica ocurrida en el edificio de servicios corporativos.



Figura 29. Proporción del tipo de falla relacionada a los huecos de tensión en el edificio de servicios corporativos.

Tenemos variedad de causas de los huecos de tensión, de las cuales resalta significativamente los contactos por animal. Este tipo de fallas es de las más comunes en las redes de distribución área, ya que en muchas estructuras no se

tiene la protección profauna correctamente instalada, dejando expuestos los aisladores y los conductores desnudos que van a los transformadores, existiendo una alta probabilidad de fallas en la red.

Existen contactos por animales dentro de las subestaciones; esto se debe a que estas no están debidamente aisladas, permitiendo que crezca vegetación dentro de estas o en los alrededores, siendo factible para animales rastreros acceder a las instalaciones de la subestación. Incluso las aves juegan un papel crucial en los contactos por animal en las subestaciones, ya que estas, al buscar el lugar adecuado para establecer su nido, pueden iniciar la creación de este en las subestaciones, significando un alto riesgo.

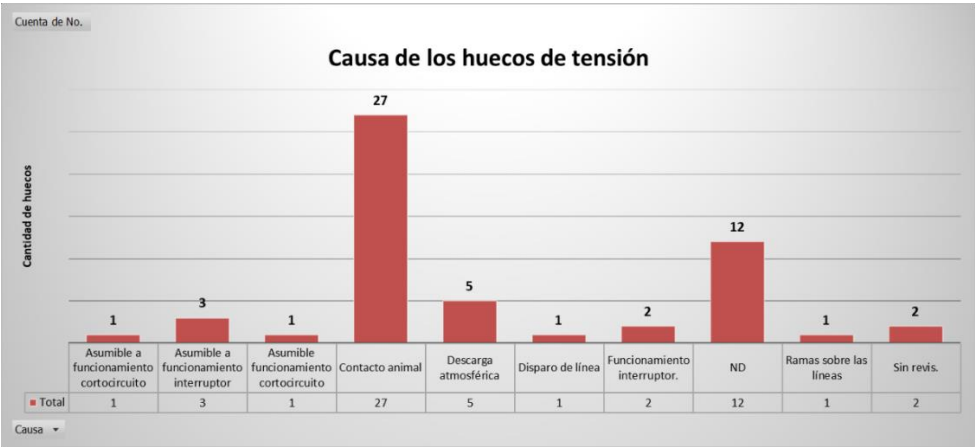


Figura 30. Causalidad de los huecos de tensión en el edificio de servicios corporativos.

Así como ocurrió con la empresa cartonera y la empresa embotelladora embotelladas, el mes crítico dentro del periodo de control fue julio 2024, con un total de 17 huecos de tensión críticos. Se puede observar que, del total de 55 huecos de tensión críticos, medidos, 9 de estos no fueron mitigados 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.

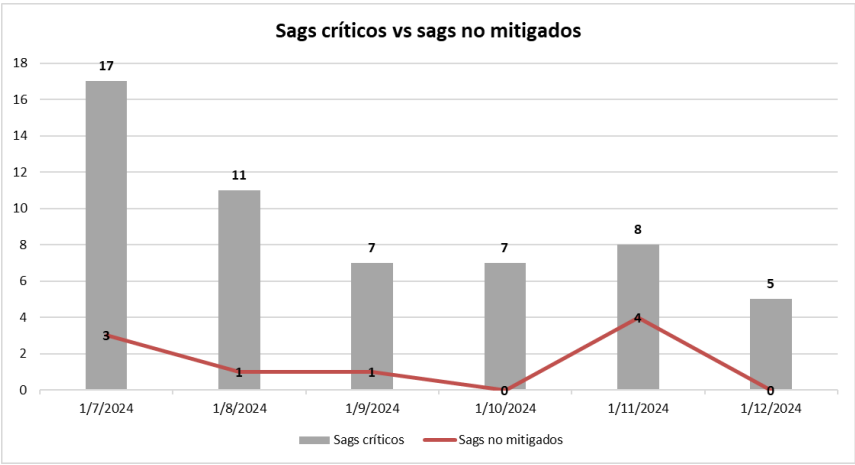


Figura 31. Comparación entre los huecos de tensión críticos y los huecos de tensión mitigados en el edificio de servicios corporativos.

3.5.4 Proyección de resultados en empresas estudiadas

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 nosotros proyectamos la efectividad calculada (83.64%) en las empresas estudiadas, principalmente en la cartonera ya que es la más afectada a nivel de huecos de tensión, estos se verán reducidos.

No hay que dejar de lado los huecos de tensión no críticos; si bien es cierto no se han analizado a fondo las posibles causas de estos, suelen ser eventos que afectan a las maquinarias de electrónica sensible, llegando a causar interrupciones en la

producción. La efectividad del SagFighter para los huecos de tensión no críticos es del 100%, por lo que también se proyectará este valor en las demás empresas.

3.5.4.1 Empresa cartonera

En el periodo de estudio, comprendido del 1 de julio al 31 de diciembre de 2024, se registraron un total de 1123 huecos de tensión divididos en 120 críticos y 875 no críticos.

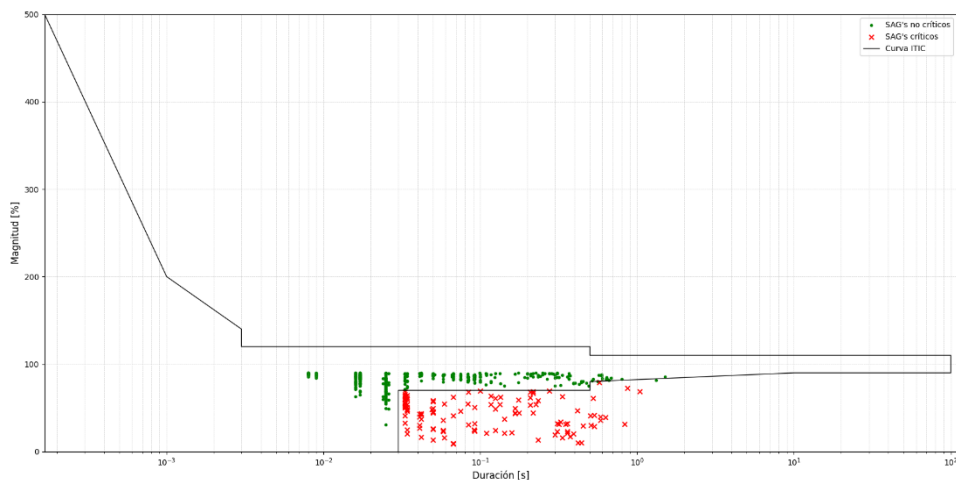


Figura 32. Curva ITIC con todos los huecos de tensión registrados en la empresa de cartonera.

Se puede observar en la Curva ITIC una sobresaturación de eventos no críticos, significando que el cliente sufre de forma excesiva las consecuencias de la ocurrencia de estos eventos. La instalación de un SagFighter en la empresa cartonera podría reducir **significativamente** la cantidad de huecos de tensión, tanto críticos como no críticos, que afectan las instalaciones de la planta.

En el edificio de servicios corporativos también tuvimos una efectividad mensual, por lo que proyectando estos resultados tendríamos lo siguiente:

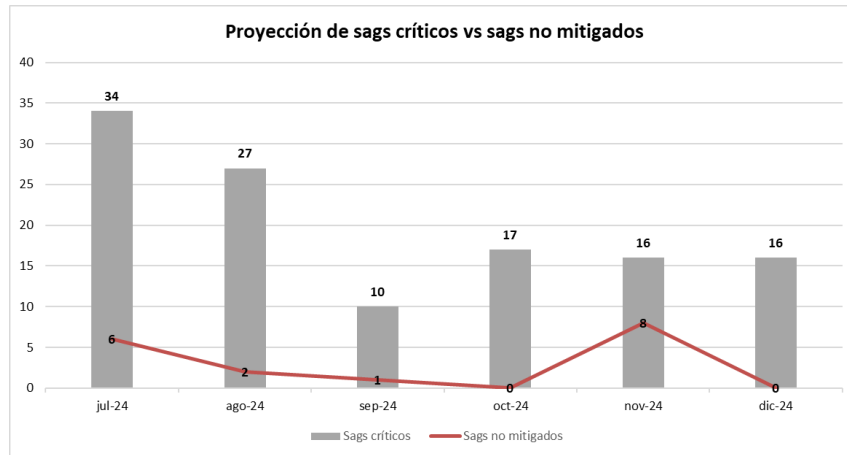


Figura 33. Comparación entre los huecos de tensión críticos y la proyección de los mitigados, en la empresa cartonera.

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, mejorando considerablemente mejorando considerablemente la estabilidad del sistema y minimizando las posibles interrupciones de producción en la planta.

Si viésemos los eventos a partir de la proyección realizada, la curva ITIC correspondiente al periodo de control de la empresa cartonera se vería de la siguiente manera:

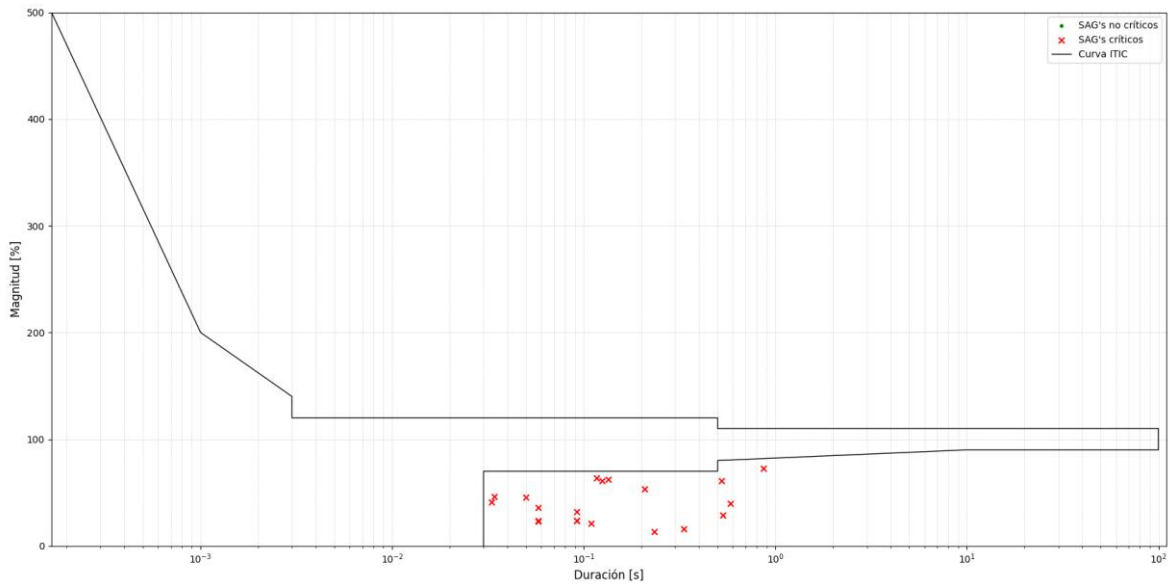


Figura 34. Proyección de huecos de tensión mitigados en la curva ITIC, en la empresa cartonera.

3.5.4.2 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.

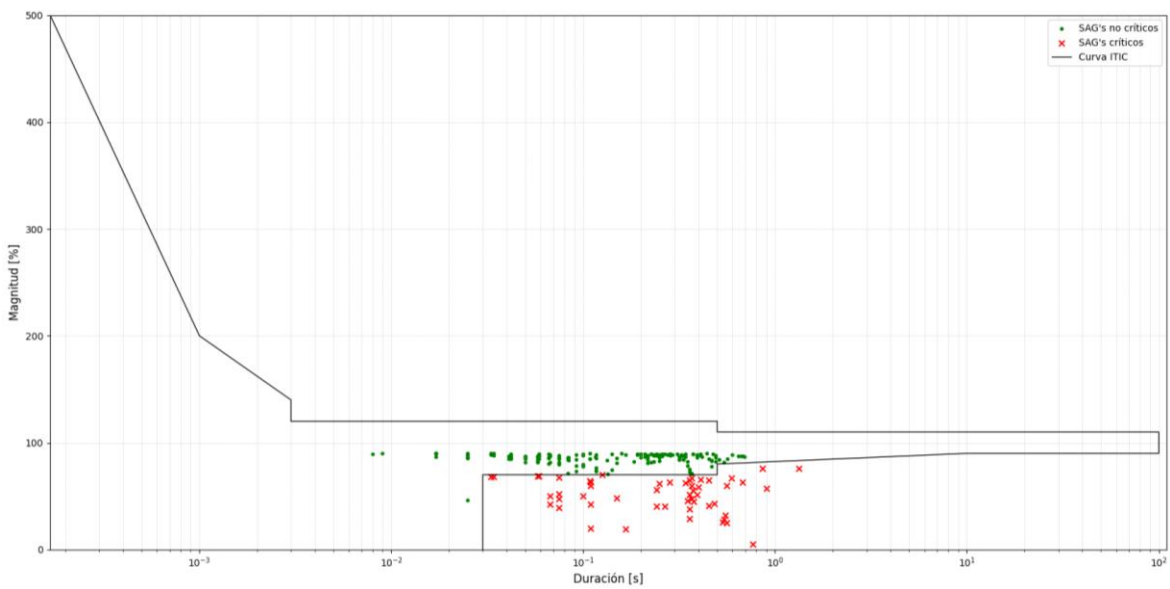


Figura 35. Curva ITIC con todos los huecos de tensión registrados en la empresa de embotelladora.

Comparando contra la empresa cartonera, tenemos una cantidad menor de huecos de tensión registrados en el periodo de control, significando que la red a la que esta empresa está conectada está en mejores condiciones, disminuyendo la cantidad de fallas transitorias y permanentes y, por lo tanto, disminuyendo la ocurrencia de eventos críticos. Cabe recalcar que, a diferencia de la cartonera, este usuario se encuentra más cercano a la subestación, por lo que su nivel de tensión es mejor.

El objetivo es poder demostrar que, con el SagFighter, se puede disminuir considerablemente los eventos que afectan a las plantas de producción. Aplicando el mismo principio, los resultados proyectados serían los siguientes:

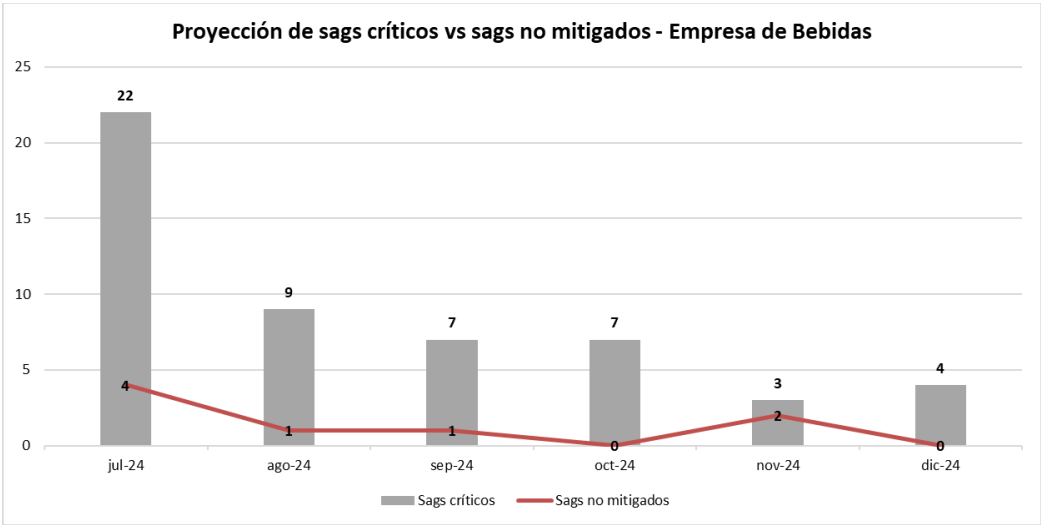


Figura 36. Comparación entre los huecos de tensión críticos y la proyección de los mitigados, en la empresa embotelladora.

Al aplicar la efectividad global, se estima que habría unos 9 huecos de tensión durante el periodo de estudio, lo que equivale a menos de 4 incidentes críticos al mes. 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.

Si analizamos los eventos proyectados, la curva ITIC correspondiente al periodo de control de la empresa cartonera quedaría representada de esta forma:

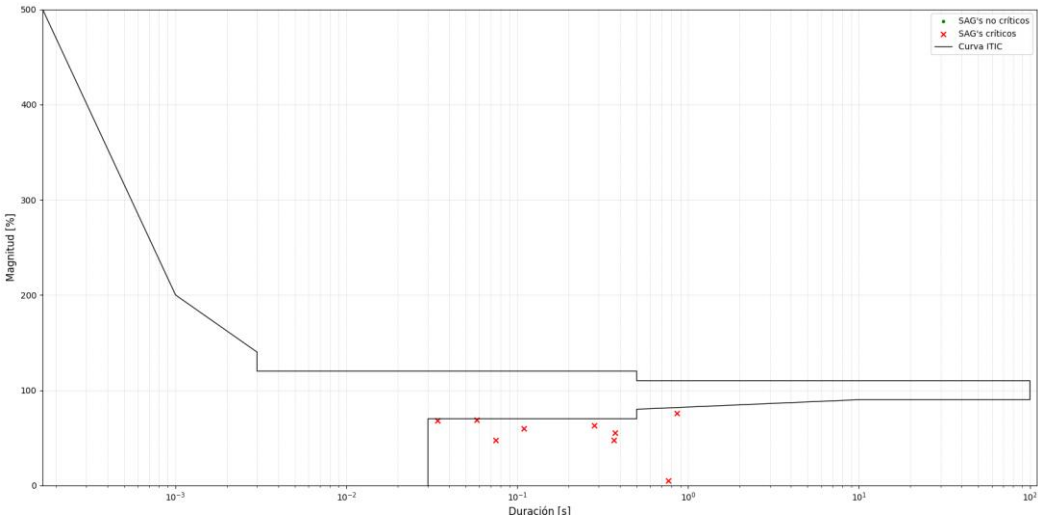


Figura 37. Proyección de huecos de tensión mitigados en la curva ITIC, en la empresa embotelladora.

CAPÍTULO CUATRO: CONCLUSIONES

- Se analizaron estadísticamente los parámetros de tensión, tasa de distorsión armónica total, flicker y los huecos de tensión a partir de las mediciones, donde se identificó una mayor ocurrencia de huecos de tensión en los meses de julio y agosto de 2024, los cuales coinciden con la época lluviosa en El Salvador. Este patrón resalta la importancia de fortalecer el mantenimiento preventivo de parte de la distribuidora en esos periodos.
- Se identificaron los principales problemas de calidad de energía que afectaron negativamente a las empresas evaluadas. En la empresa cartonera, la cantidad de registros fuera del límite de distorsión armónica de corriente incumplió con lo establecido por SIGET en un 13.71%. Además, ambas empresas experimentaron impactos constantes por huecos de tensión críticos, un problema prioritario que requiere atención urgente.
- Se detectó las causas de los huecos de tensión en las industrias medidas, siendo las fallas a nivel de distribución y transmisión las más comunes. Para la empresa cartonera, el 68.18% de los huecos de tensión críticos fueron ocasionados por fallas (tanto momentáneas como sostenidas) a nivel de distribución y 11.36% por eventos a nivel de transmisión, mientras que para la empresa embotelladora, el 68.42% fueron ocasionados por eventos a nivel de transmisión. Esto significa que, en caso de no brindar mantenimiento a la red, los huecos de tensión seguirán teniendo un alto impacto en las instalaciones de los clientes, especialmente en la época lluviosa.
- Se comparó la calidad de la energía en la entrada y la salida de la subestación del cliente, obteniéndose una efectividad de mitigación del 83.64% para los

huecos de tensión críticos y 100% para los no críticos. Esto indica que, en función de la proyección realizada a partir de los resultados obtenidos, las interrupciones en el funcionamiento de las maquinarias industriales por esta perturbación se verían significativamente disminuidas, mejorando la continuidad de los procesos.

BIBLIOGRAFÍA

- Baggini, A. B. (Ed.). (2008). *Handbook of power quality*. John Wiley & Sons.
- Echevarría, C., Jesurun-Clements, N., Mercado Díaz, J. E., & Trujillo, C. (2017, abril). *Integración eléctrica centroamericana: Génesis, beneficios y prospectiva del Proyecto SIEPAC*. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://doi.org/10.18235/0012708>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2006). *IEEE recommended practice for powering and grounding electronic equipment* (IEEE Std 1100-2005). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2006.216391>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2014). *IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems* (IEEE Std 519-2014). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6826459>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2018). *IEEE standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces* (IEEE Std 1547-2018). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8332112>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2019). *IEEE recommended practice for monitoring electric power quality* (IEEE Std 1159-2019). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8796486>
- Rogowska, J., & Brezinski, M. E. (2000). Evaluation of the adaptive speckle suppression filter for coronary optical coherence tomography imaging. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 19(12), 1261–1266. <https://doi.org/10.1109/42.897820>
- Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones. (s.f.). *Normas de calidad del servicio de los sistemas de distribución*. SIGET.

ANEXOS



Utility Systems Technologies, Inc.
P.O. Box 110
Latham, NY 12110

SagFighter™ Active Voltage Conditioner / Sag Ride Through (SRT)

Overview

The SagFighter™ is an industrial-grade, solid state, electronic voltage sag corrector/active voltage conditioner that operates without batteries or energy storage.



Industrial-grade means the SagFighter is compatible with all non-regenerative load types and load power factors and provides a minimum 1,000% fault-clearing capability. Unlike computer-grade products or uninterruptible power supplies (UPS), the SagFighter is designed for frequent high-inrush current and low-power factor loads without the need to over-size the product.

The SagFighter provides the following features:

- Sag protection compliant with SEMI-F47
- Full sag correction within 2 milliseconds
- Sag correction duration independent of load or power factor
- Sag correction for a minimum of 100 seconds
- No need for bypass operation for high inrush or overload currents
- Continuous protection without the need to recharge or reset
- Non-continuous inverter operation that increases reliability and provides 99% efficiency
- Battery-free design

The SagFighter consists of a three-phase transformer with each of its secondary windings connected in series between the source (incoming line) and the load(s). Load current flows through the secondary windings of the transformer while the unit operates in a “monitoring” mode with the primary transformer windings shorted through SRC switches.

The SagFighter™ continuously monitors the input voltage waveform for any deviation from a balanced, three-phase voltage. Upon sensing a deviation, the Sag Fighter engages an inverter circuit to apply an injection voltage to the primary windings of the series-connected transformer. The injection voltage is synthesized with a magnitude, shape, and phase angle so that when it is added in series with the incoming voltage, a balanced, three-phase voltage results. When normal, three-phase incoming voltage is detected at the SagFighter input, the inverter circuit is disengaged and the unit returns to monitoring mode.

The SagFighter is thermally ranged to provide continuous correction for a voltage sag, although this is not normally required.

The SagFighter uses natural convection cooling and has no fans or other moving parts. Larger units may include heat-sink fans that operate only when the unit is correcting a sag event. An automatic electronic failsafe bypass is incorporated into the standard design so the SagFighter maintains power to the load if a unit malfunctions.

The SagFighter automatically corrects voltage sags with no operator or programming required. The unit display provides unit status and historical information on sag correction events. Alarm contacts are also provided to permit remote indication of SagFighter status.

SagFighter installation is simple. The unit arrives completely assembled and requires no programming, testing, measuring or setting of switches. It is designed to install much like a dry-type transformer: simply place the unit and make input and output wiring connections. The SagFighter typically has no maintenance schedule other than routine inspection and cleaning.

SagFighter™

Specifications

Application	
Power Rating/Size (kVA)	100, 125, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 500, 750, 1,000, 1,250, 1,500, 1,750, 2,000 kVA
Phase - Frequency (Hz)	3Ø, 50 or 60 Hz
Standard Input/Output Voltages	60 Hz: 208, 240, 480, 600 50 Hz: 220, 380, 400, 415 (non-standard voltages available)
Sag Correction/Operating Characteristics	
Sag Correction	1- or 2-phase sags to 30% remaining voltage (-70% sag) corrected to at least 95% of nominal voltage. 3-phase sags to 60% remaining voltage (-40% sag) corrected to at least 95% of nominal voltage.
Output Regulation	Nominal voltage $\pm 5\%$ during sag correction [Note: unit normally operates in monitoring mode until voltage reaches 90% of nominal voltage, at which time sag correction is initiated]
Response Time	Full sag correction typically within 2ms, regardless of load or load power factor.
Correction Duration	Sags corrected for a minimum of 100 seconds, regardless of load or power factor.
Regulation Variation	None: regulation constant for 0 to 100% load and any load power factor.
Phase Shift Correction	Phase shifts are corrected automatically during sag correction.
Harmonic Distortion	None: added in monitoring mode.
Overload/Inrush Capability	1,000 % - 1 second, 500% - 5 seconds, 200% - 1 min.; 1,000% fault clearing
Load / Power Factor	No minimum or part load or load-power factor limitations; compatible with all load types.
Efficiency	99% typical
Operating Frequency	+/- 3% from nominal frequency (50Hz or 60Hz)
Operating Environment	Performance specifications are based on the input (source) voltage meeting IEEE 519 standards.
Noise Suppression/Load Protection	
Surge Suppression	Included, complies with ANSI/IEEE C62.41, UL 1449
Input Circuit Breaker	Included, standard, UL 489, ANSI/IEEE C22.2
Failsafe Electronic Bypass	Auto-actuation on high temperature, over-current, component failure with no loss of load
Construction	
Technology	Microprocessor-controlled, inverter-based series voltage injection
Transformer	Copper-wound, dry-type series transformer (3W+G input and output)
Inverter Operation	Non-continuous operation – only during sag correction
Cooling	Natural convection cooled with heat-sink fans used only during sag correction [contaminant free, dry, clean air]
Enclosure	Floor-mounted NEMA-1, ANSI 61 grey. Custom enclosures also available – contact factory.
Cabling/Connections	See enclosure drawing for cable entry/exit options and circuit breaker/lug size table.
Audible Sound Level	Less than 65dB @ 1 meter
Display	Touch-screen display with event history recorder, operational data, and utilities
Controls	No controls or programming required, no user-adjustable controls
Monitoring	Contacts for remote indication of unit and surge suppression status are included.
Environmental Requirements	
Temperature - Humidity	Ambient 32° to 104°F (0 to 40°C) – Relative humidity 0-95% non-condensing
Operating Altitude	0 to 3,300 ft (1000m)

SagFighter™

Options

Option	Code	Description
50 Hz	5	Required to identify 50Hz units - standard units are 60Hz
Power Monitor with ModBus Communications	C	Local, push-button digital display of amps, volts, power factor, Power. For input and/or output.
Non-Standard Enclosure	E	Per customer specification. Contact factory for further details.
Mechanical bypass	M	An open transition bypass to power load while isolating the SagFighter™ for inspection or maintenance. The standard SagFighter includes an automatic failsafe internal bypass to maintain power to the load in the event of a malfunction and may operate indefinitely on this internal bypass. The internal bypass will be supplied even if the mechanical bypass option is selected.
Non-Standard Voltages	N	For any non-standard input or output voltage
Wiring Labels	L	
Undefined Options (custom)	Q	Option designed to meet specific customer requirement

SagFighter™

Weights and Dimensions•

kVA	Height Inches (cm)	Width Inches (cm)	Depth Inches (cm)	Weight - 60Hz Lbs. (kg)	Weight - 50Hz Lbs. (kg)	Enclosure
100	46 (117)	36 (91)	28 (71)	1000 (455)	500	S36
125	65 (165)	44 (112)	33 (84)	1150 (523)	575	S44
150	65 (165)	44 (112)	33 (84)	1300 (591)	650	S44
200	65 (165)	44 (112)	33 (84)	1600 (727)	800	S44
250	65 (165)	44 (112)	33 (84)	2000 (909)	1,000	S44
300	80 (203)	56 (142)	40 (102)	2400 (1091)	1,200	S56
350	80 (203)	56 (142)	40 (102)	2800 (1273)	1,400	S56
400	80 (203)	72 (183)	48 (122)	3500 (1591)	1,909	S72
500	80 (203)	72 (183)	48 (122)	4500 (2045)	2,455	S72
600	80 (203)	72 (183)	48 (122)	5500 (2500)	3,000	S72
750	80 (203)	85 (216)	66 (168)	6500 (2955)	3,250	S85
1,000	80 (203)	85 (216)	66 (168)	8500 (3864)	4,250	S85
1,250	80 (203)	85 (216)	66 (168)	10000 (4545)	5,000	S85
1,500	80 (203)	96 (244)	78 (198)	11000 (5000)	5,500	S96
1,750	80 (203)	120 (305)	78 (198)	12000 (5455)	6,000	S120
2,000	80 (203)	120 (305)	78 (198)	13000 (5909)	6,500	S120

* Weights and dimensions for standard units. Certain options may require a larger enclosure or increase the weight.

Contact factory for details



Utility Systems Technologies, Inc. | P.O. Box 110, Latham, NY 12110
 Phone: 888-403-9084 | Fax: 518-377-2207
 Email: sales@ustpower.com | Web: ustpower.com



The UST SagFighter™ protects against costly production stops and manufacturing errors due to voltage sags in all industrial applications.





About SagFighter™

SagFighter™ actively corrects common electrical events, allowing manufacturers to ride through sags with no impact on equipment and no errors in production.

The UST SagFighter™ protects against costly production stops due to voltage sags in all industrial applications. It offers must-have protection for all continuous production processes and other power-critical applications, and can be custom-configured to meet specific engineering designs.

Operating without batteries or energy storage of any kind, the near-zero maintenance SagFighter monitors and actively corrects incoming voltage within 2 milliseconds.

Unlike computer-grade products or uninterruptible power supplies (UPS), SagFighter is designed for typical production environment loads where high inrush conditions can occur. There is no need to oversize SagFighter given its robust design scheme and superior overload protection characteristics (1,000% for 1 second).

SagFighter is available in a full range of sizes, from 50kVA to 2,500kVA, to meet any application demand.



Specs

Application

Standard Input/Output 3-Phase Voltages	60Hz: 208, 480, 600 50Hz: 220, 380, 400, 415
--	---

Regulation / Operating Characteristics

Sag Correction - Single Phase voltage event (sag)	80% sag (20% remaining voltage) corrected to 95% of nominal voltage. 90% sag (10% remaining voltage) corrected to 90% of nominal voltage.
Sag Correction - 3- Phase voltage event (sag)	40% sag (60% remaining voltage) corrected to 95% of nominal voltage. 42.5% sag (57.5% remaining voltage) corrected to 90% of nominal voltage.
Output Regulation	Regulation tolerance is +/-5% (typical) (Note: SagFighter normally operates in monitoring mode until voltage reaches 90% of nominal voltage, at which time sag correction is initiated.)
Response Time	Full sag correction within 2ms regardless of load or load power factor.
Correction Duration	Sags corrected for a minimum of 100 seconds regardless of load or load power factor.
Regulation Variation	None - Regulation constant for 0 to 100% load and any load power factor.
Phase Shift Correction	Phase shifts are corrected automatically during sag correction.
Harmonic Distortion	None added in monitoring mode.
Overload / Inrush Capability	1,000% - 1 second, 500% - 5 seconds, 200% - 1 minute (while in bypass mode).
Load / Power Factor	1 cycle typical regardless of load or load power factor.
Efficiency	99% typical
Operating Environment	Performance data specifications are based on the input (source) voltage meeting IEEE 519 standards.
Operating Frequency	± 3% of nominal frequency (50Hz or 60Hz).

Construction

Technology	Microprocessor-controlled, inverter based series voltage injection.
Transformer	Copper wound, dry-type series transformer (3W+G input and output).
Inverter Operation	Non-continuous operation - activation only during sag correction.
Cooling	Natural convection, w/ heatsink fans which operate only during sag correction [contaminant free, dry, clean air].
Enclosure	Floor mounted NEMA-1 indoor enclosure is standard. ANSI 61 gray. [Custom enclosures (indoor or outdoor) also available - contact UST.]
Cabling / Connections	See enclosure drawing for cable entry/exit options and input circuit breaker lug sizes.
Audible Sound Level	Less than 65dB @ 1 meter.
Display	Touchscreen w/ event history recorder, operational data, and utilities.
Controls	Automatic operation - no controls, programming, or user adjustments required.
Monitoring	Dry-contacts for remote indication of unit status are included as standard. Optional power metering with various communication protocols available - contact UST.

Environmental Requirements

Temperature - Humidity	Ambient operating conditions: 32°F to 104°F (0 to 40°C) - Relative humidity 0-95% non-condensing
Operating Altitude	0 to 3,300 ft. (1,000 M). Typical derating of 0.3% for every 100M over 1,000M

Power. Made Perfect.SM

UST SAGFIGHTER™ FEATURES

SEMI F47 compliant

Battery free and near-zero maintenance – no service/maintenance contracts needed

Full sag correction within 2 milliseconds

Sag correction duration independent of load or power factor

Sag correction for 100 seconds minimum

Robust industrial design – offering continuous protection for industrial loads (motors, production machinery, etc.), with no need for bypass operation even during adverse inrush (high current) conditions

Continuous protection without needing to recharge or reset

Input circuit breaker provided as standard, optional maintenance bypass arrangements also available (input, bypass, output)

Custom enclosure designs available to meet indoor or outdoor site conditions

Non-continuous inverter operation that increases reliability and provides 99% efficiency during normal operation

Optional power meters available with communication features for connection to remote hardware or building management systems



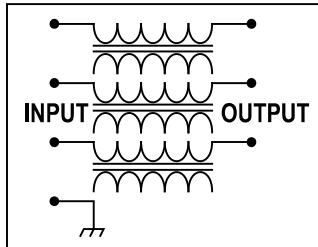
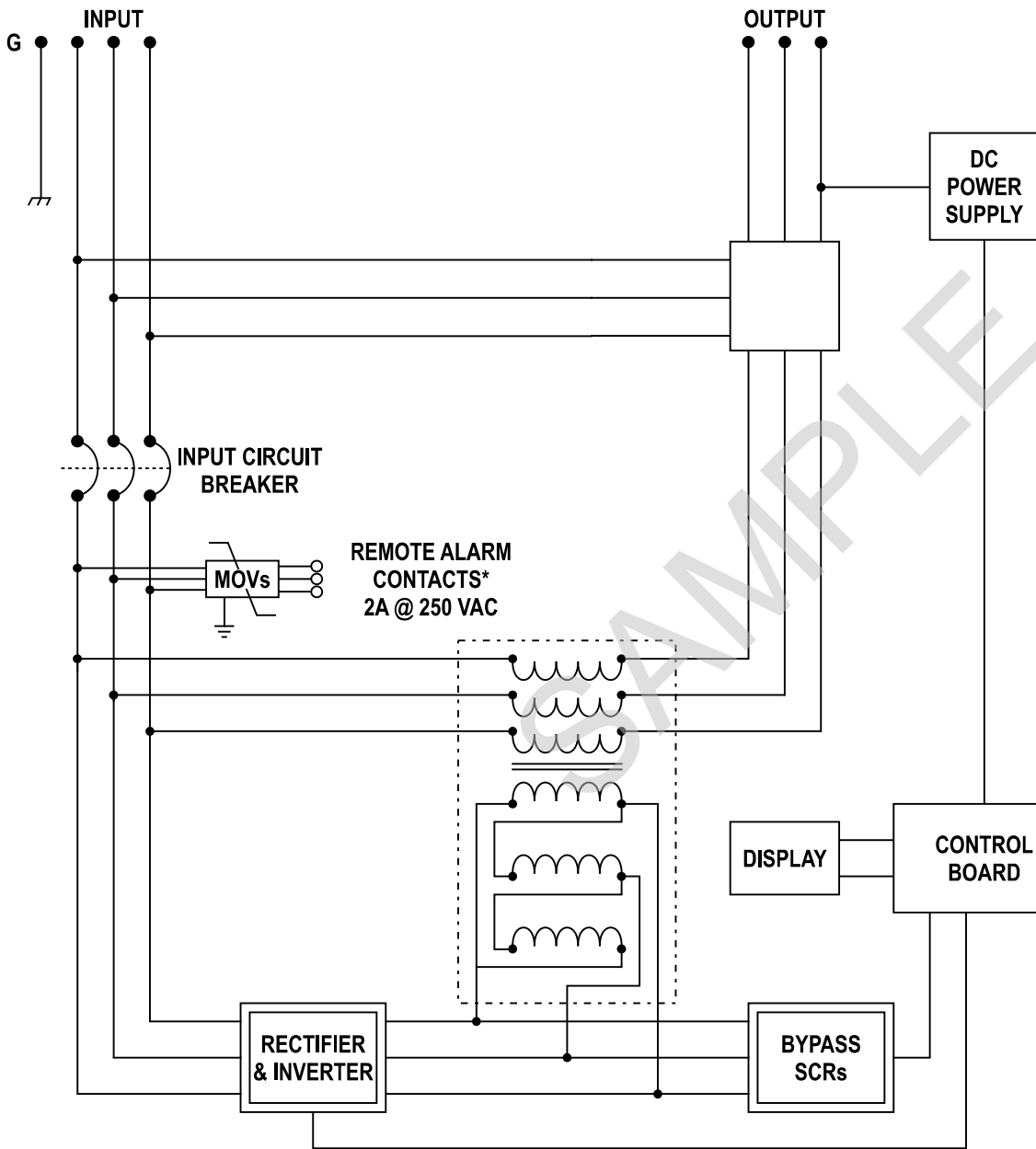
email: sales@ustpower.com

tel: (toll free) 888 403 9084 or 518 326 4142

web: ustpower.com

mail: P.O. Box 110, Latham, New York 12110-0110

Utility Systems Technologies, Inc. (UST) is a world-leading designer and manufacturer of electronic voltage control and power-conditioning products. UST's products are in use worldwide at hospitals, factories, refineries, embassies, data centers and other critical facilities, mitigating the risk of damaging electrical surges, sags and swells, bridging brownouts, and providing a safe connection to the local grid.



● POWER WIRING INTERFACE POINTS
 ○ CONTROL WIRING INTERFACE POINTS
 * ALL CONTROL WIRING IS DISCRETIONARY

REMOTE ALARM CONTACT*
 0.6A @ 125VAC
 0.6A @ 110VAC
 2.0A @ 30VDC



Utility Systems Technologies, Inc.
 PO Box 110, Latham New York 12110

TITLE:
 SAG FIGHTER ELECTRICAL SCHEMATIC

REV: 2 DATE: January 22, 2009
 REV: 1 DATE: AUGUST 15, 2008
 REV: 0 DATE: DECEMBER 03, 2007

SIZE: A	DWG NO.: SRT-0000-000	REV: 0
-------------------	---------------------------------	------------------

SCALE: NONE **SHEET:** 1 OF 1

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF UTILITY SYSTEMS TECHNOLOGIES, INC.
 ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF UTILITY SYSTEMS TECHNOLOGIES, INC. IS PROHIBITED